



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΜΟΡΡΟΥ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ  
GCL ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ***

*Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή*

*Στρατίδη Παναγιώτη*

***Επιβλέποντες***

Ριζιώτης Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής,  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Προσπαθόπουλος Ιωάννης, Ε.ΔΙ.Π.,  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

---

*Αθήνα, Οκτώβριος 2019*

### *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον κ. Ριζιώτη για την εμπιστοσύνη, βοήθεια και κατανόηση που έχει δείξει καθ' όλη την διάρκεια αυτής της διπλωματικής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Προσπαθόπουλο για το ενδιαφέρον του και την σημαντική βοήθειά που μου προσέφερε σε πολύ κρίσιμα σημεία της διπλωματικής.

Τέλος ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου που με στήριξαν ψυχολογικά και οικονομικά για την περίοδο αυτή.

## ***Περίληψη***

Η δημιουργία ενός αξιόπιστου και υπολογιστικά μη απαιτητικού προτύπου για την μοντελοποίηση του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας είναι πολύ σημαντική για τον σχεδιασμό νέων αλλά και για την αναβάθμιση υφιστάμενων αποδοτικών αιολικών πάρκων. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μοντελοποίηση και αξιολόγηση του προτύπου που ανέπτυξε ο Gunner Christian Larsen για την πρόβλεψη του ομόρρου ανεμογεννήτριας. Για αυτό τον σκοπό μελετήθηκαν δυο παραλλαγές του προτύπου. Η πρώτη είναι η εφαρμογή του GCL που έγινε στην θέσπιση του ευρωπαϊκού προτύπου αιολικής ενέργειας II (EWTSII) από το ευρωπαϊκό συνέδριο αιολικής ενέργειας το 1999. Η δεύτερη παραλλαγή δημιουργήθηκε από τον ίδιο τον Larsen το 2009. Η αξιολόγηση των δυο μοντέλων θα γίνει συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με πειραματικές μετρήσεις από διάφορα ευρωπαϊκά ερευνητικά κέντρα.

## ***Abstract***

The development of a reliable and computationally non intensive model for predicting the wake of a wind turbine is crucial for planning new and upgrading existing wind farms. The target of the present thesis is the development and assessment of the model created by Gunner Christian Larsen for predicting the wake of a wind turbine. For that purpose, two variations of the model were developed and studied. The first is the version of GCL that was introduced in the European Wind Turbine Standard II (EWTSII) by the European Wind Conference in 1999. The second variation was developed by Larsen himself at a later date in 2009. The assessment of the models will take place by comparing the simulations with experimental data from various European research centers.

## **Πίνακας Περιεχομένων**

Περίληψη.....	3
Abstract .....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>6</b>
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>6</b>
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Στόχος και Διάρθρωση Μελέτης.....	7
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>8</b>
<b>2 Καταγραφή των υπαρχόντων μοντέλων .....</b>	<b>8</b>
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Κινηματικά μοντέλα.....	8
2.2.1 Μοντέλο Jensen .....	8
2.2.2 Μοντέλο G.C. Larsen .....	10
2.2.3 Αναλυτικό μοντέλο Frandsen .....	11
2.2.4 Μοντέλο Abramovich .....	13
2.3 Μοντέλα Πεδίου.....	14
2.3.1 Δυσδιάστατα μοντέλα .....	14
2.3.2 Τρισδιάστατα μοντέλα πεδίου .....	16
2.4 Αυτόνομα μοντέλα τύρβης.....	17
2.4.1 Danish Recommendation .....	17
2.4.2 Μοντέλο Larsen .....	18
2.4.3 Μοντέλο Frandsen/DIBt .....	18
2.4.4 Μοντέλα Quarton/TNO .....	20
2.4.5 Μοντέλο Lange .....	21
2.4.6 Μοντέλο ForWind .....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>22</b>
<b>3 Μοντέλο Gunner C Larsen και εφαρμογή του .....</b>	<b>22</b>
3.1 Παραλλαγές EWTSII και GCL 2009 .....	22
3.2 Λύση 2ης τάξης.....	23
3.3 Εφαρμογή των προτύπων .....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>26</b>
<b>4 Αξιολόγηση Μοντέλων .....</b>	<b>26</b>
4.1 Πείραμα Nibe .....	26
4.2 Πείραμα Sexbierum.....	33

4.3	Πείραμα EWTW (ECN Test Farm) .....	38
4.4	Πείραμα Navarra .....	44
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>50</b>
	<b>5 Συμπεράσματα.....</b>	<b>50</b>
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>51</b>
	<b>6 Βιβλιογραφία.....</b>	<b>51</b>

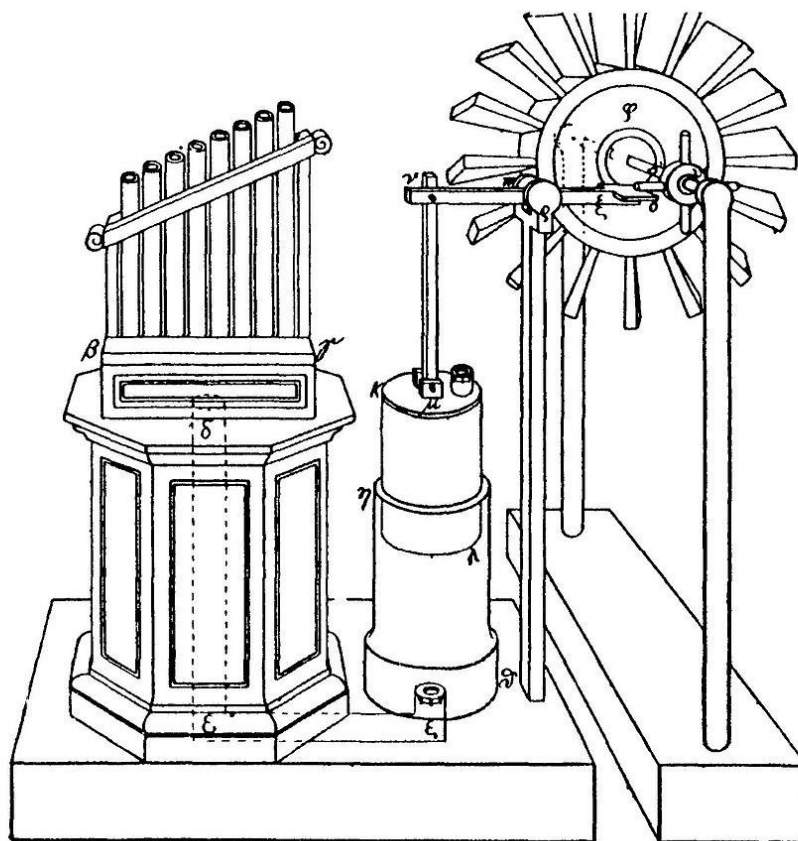
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1 Εισαγωγή

#### 1.1 Εισαγωγή

Αν και ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται την ενέργεια του ανέμου εδώ και χιλιετίες, μόνο τα τελευταία 50-80 χρόνια έχουμε δει αλματώδη αύξηση στην παγκόσμια αξιοποίηση του.

Η πρώτη καταγεγραμμένη τέτοια εφαρμογή ήταν ένας ανεμόμυλος που σχεδιάστηκε από τον Ήρωνα της Αλεξάνδρειας τον 1<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. και είναι η πρώτη γνωστή περίπτωση χρήσης τροχού που κινείται από τον άνεμο για την λειτουργία μηχανής.



Εικόνα1.1 Πρώτη εφαρμογή μηχανής ανέμου του Ήρωνα

Η συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν οριζόντιου άξονα περιστροφής. Στη συνέχεια κατά το 700 μ.Χ. άρχισαν να χτίζονται ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα περιστροφής και γύρω στο 1500 μ.Χ. χρησιμοποιήθηκαν ως μέρος του αντιπλημμυρικού συστήματος της Ολλανδίας. Κυρίως χρησιμοποιούνταν για την άλεση γεωργικών προϊόντων και την άντληση νερού. Τα περύγιά τους ήταν πάνινα, γύρω στα 5-15 μέτρα μήκος και πλάτος το 1/5 του μήκους τους. Ένας ανεμόμυλος μπορούσε να αλέσει 20-70 κιλά σιτηρών ανά ώρα ανάλογα με την ένταση και την φορά του ανέμου.

Οι πρώτες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίστηκαν την δεκαετία του 1980. Τυπικά χρησιμοποιούσαν διαμέτρους ρότορα περίπου 20 μέτρων και μπορούσαν να παράγουν μεταξύ 20 και 60

kW ισχύος. Σήμερα Ανεμογεννήτριες πολλαπλών MW είναι τα πιο δημοφιλή μοντέλα. Η μεγαλύτερη σύγχρονη εμπορικά διαθέσιμη ανεμογεννήτρια από πλευράς ισχύος είναι η MHI Vestas V164 με ισχύ παραγωγής 9,5 MW και διάμετρο ρότορα 164 μέτρα, η οποία προορίζεται για εγκαταστάσεις offshore. (Ten of the Biggest Turbines, 2018) Επίσης υπάρχουν σχέδια από πλευράς GE για την κατασκευή της μεγαλύτερης και ισχυρότερης offshore ανεμογεννήτριας στον κόσμο με ισχύ 12 MW και ακτίνα πτερυγίων που φτάνει τα 107 μέτρα. (Frangoul, 2018)



Σε μια ανεμογεννήτρια καθώς ο αέρας διέρχεται από τον δίσκο του ρότορα αφαιρείται μέρος της ενέργειάς του, η οποία μετατρέπεται σε κινητική του ρότορα, και κάποιες από τις ιδιότητες της ροής του αλλάζουν. Η ταχύτητα της ροής μειώνεται και το επίπεδο της τύρβης αυξάνεται. Η περιοχή αυτή της ροής πίσω από την ανεμογεννήτρια, στην οποία αυτές οι ιδιότητες έχουν αλλάξει

λέγεται ομόρρους της ανεμογεννήτριας. Σαν γενικός κανόνας είναι ότι οι επιδράσεις του ομόρρου μπορούν να αγνοηθούν σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 10 διαμέτρους δρομέα κατάντι της ανεμογεννήτριας. Παρόλα αυτά λόγω περιορισμένου χώρου και αυξημένης ενεργειακής ανάγκης συνήθως η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο γίνεται πιο πυκνά με αποτέλεσμα να υπάρχουν αλληλεπιδράσεις του ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας και των κατάντι ανεμογεννητριών.

Οι κύριες επιδράσεις ενός ομόρρου σε μια ανεμογεννήτρια είναι η απώλεια ισχύος λόγω της μειωμένης ταχύτητας του ανέμου μέσα σε αυτό σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου περιβάλλοντος και η αυξημένη καταπόνηση της λόγω του αυξημένου επιπέδου τύρβης, κάτι που οδηγεί σε μειωμένη διάρκεια ζωής. Για αυτούς τους λόγους είναι σημαντικό να μπορούμε να μοντελοποιήσουμε με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια αυτήν τη περιοχή της ροής κατάντι μιας ανεμογεννήτριας ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε ποιες κατάντι ανεμογεννήτριες θα επηρεαστούν και ποια θα είναι αυτή η επίδραση. Μέσω αυτών των μοντέλων προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε την χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο με στόχο την μέγιστη παραγωγή ισχύος.

## 1.2 Στόχος και Διάρθρωση Μελέτης

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι ο προγραμματισμός σε περιβάλλον Fortran, η εφαρμογή και η αξιολόγηση του μοντέλου ομόρρου που εισήγαγε ο G C Larsen. Για αυτό τον σκοπό θα χρησιμοποιηθούν 2 παραλλαγές του μοντέλου. Η πρώτη είναι από το ευρωπαϊκό πρότυπο αιολικής ενέργειας II (EWTSII) και η δεύτερη είναι μια αναθεώρηση του μοντέλου από τον ίδιο τον Larsen το 2009.

Στο κεφάλαιο 2 θα γίνει μια καταγραφή των υπάρχοντων μοντέλων ομόρρου και τύρβης μέσα στα οποία συμπεριλαμβάνονται και το μοντέλο του G C Larsen με την έκδοσή του EWTSII.

Στο κεφάλαιο 3 θα γίνει μια μεγαλύτερη εμβάθυνση στα 2 εξεταζόμενα μοντέλα όπου θα παρουσιαστούν και θα παρουσιαστούν οι διαφορές μεταξύ τους. Επίσης θα παρουσιαστεί η λύση 2<sup>ης</sup> τάξης του μοντέλου.

Στο κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστούν οι συνθήκες και το πλαίσιο του κάθε πειράματος που χρησιμοποιήθηκε μαζί με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από τα δυο μοντέλα.

Τέλος στο κεφάλαιο 5 θα γίνει ένας τελικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν και το τελικό συμπέρασμα της αξιολόγησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2 Καταγραφή των υπαρχόντων μοντέλων

#### 2.1 Εισαγωγή

Ο ομόρρους μιας ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε 2 τμήματα. Το 1<sup>ο</sup> είναι ο κοντινός ομόρρους που ξεκινάει αμέσως πίσω από τον δρομέα και συνεχίζει για μια απόσταση μερικών διαμέτρων δρομέα και το 2<sup>ο</sup> είναι ο μακρινός ομόρρους οπού ξεκινάει μετά τον κοντινό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εναλλαγή μεταξύ των δύο τμημάτων δεν γίνεται απότομα αλλά αντιθέτως σταδιακά κατά μήκος του ομόρρου και έτσι δεν υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στο οποίο μπορούμε να εντοπίσουμε την αλλαγή αυτή αλλά μιλάμε για μια περιοχή μετάβασης. Διαφορετικά μοντέλα προτείνουν διαφορετικά μήκη για το κοντινό ομόρρου που κυμαίνονται από 1 διάμετρο μέχρι πολλαπλές διαμέτρους δρομέα. Στα στρώματα διάτμησης του κοντινού ομόρρου παρατηρείται το μεγαλύτερο έλλειμμα ταχύτητας και τα μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης στη ροή. Τα τελευταία χρόνια αρκετές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην μοντελοποίηση του κοντινού ομόρρου αλλά λόγω της υψηλής απαιτητικότητάς τους σε υπολογιστική ισχύ δεν χρησιμοποιούνται για γενικές μελέτες αιολικών πάρκων. Η παρούσα διπλωματική θα επικεντρωθεί για το λόγο αυτό στα μοντέλα του μακρινού ομόρρου.

Τα μοντέλα του μακρινού ομόρρου διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, στα κινηματικά μοντέλα και στα μοντέλα πεδίου.

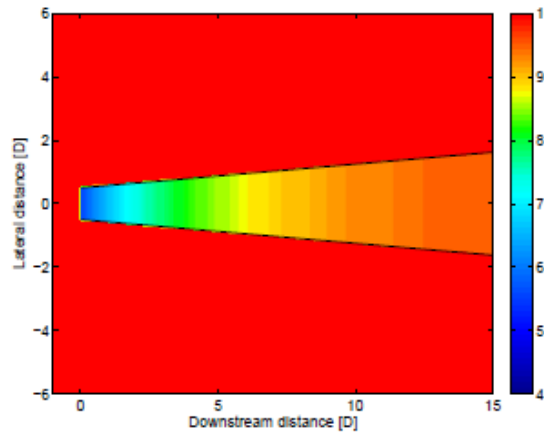
#### 2.2 Κινηματικά μοντέλα

Τα κινηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν μόνο την εξίσωση της ορμής για να μοντελοποιήσουν το έλλειμμα ταχύτητας του ομόρρου πίσω από την ανεμογεννήτρια. Οι περιγραφές του ομόρρου δεν λαμβάνουν υπόψη τους την αρχική περιοχή διαστολής του ομόρρου. Δεν λαμβάνεται επίσης υπόψη η αλλαγή στο επίπεδο της τύρβης στο ομόρρου κατάντι της ανεμογεννήτριας οπότε τα μοντέλα πρέπει να συνδυαστούν με μοντέλα τύρβης ομόρρου αν οι τιμές της τύρβης στο αιολικό πάρκο είναι επιθυμητές

##### 2.2.1 Μοντέλο Jensen

Το μοντέλο του N.O. Jensen είναι ένα από τα παλαιότερα μοντέλα. Είναι ένα αρκετά απλό μοντέλο ομόρρου που υποθέτει γραμμικά διαστελλόμενη διάμετρο ομόρρου με έλλειμμα ταχύτητας που εξαρτάται μόνο από την απόσταση κατάντι του δρομέα. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τον ομόρρου σε κάτοψη όπως δημιουργείται αρχίζοντας από τον δρομέα και αναπτυσσόμενο κατάντι.





Εικόνα 2.1 Προφίλ ομόρρου με το μοντέλο Jensen (Renkema, 2007)

Η διάμετρος του ομόρρου δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$D_w = D(1 + 2ks) \quad (2.1)$$

και η ταχύτητα σε ένα πλήρως ανεπτυγμένο ομόρρου.

$$u = U_\infty \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + 2ks)^2} \right] \quad (2.2)$$

Εξαρτώνται και τα δυο από την σχετική απόσταση κατάντι του δρομέα,  $s=x/D$  και τη σταθερά εξασθένισης ομόρρου  $k$  (Wake Decay Constant). Λόγω του ότι η ταχύτητα του ομόρρου σε μία συγκεκριμένη απόσταση από το δρομέα είναι σταθερή, το συγκεκριμένο προφίλ ομόρρου λέγεται hat shaped (σχήματος καπέλου). Η τιμή  $k$  γενικά παίρνεται ως 0.075 που είναι επαρκής για εγκαταστάσεις ξηράς αλλά για θαλάσσιες εφαρμογές η προτεινόμενη τιμή του  $k$  είναι 0.04.

Μπορούμε να δούμε εύκολα από την εξίσωση (2.2) ότι ακριβώς πίσω από τον δρομέα η ταχύτητα του ομόρρου είναι

$$u_{s=0} = U_\infty \sqrt{1 - C_T} \quad (2.3)$$

Έτσι λόγω των απλοποιήσεων του το μοντέλο Jensen απαιτεί ο συντελεστής ώσης να είναι μικρότερος της μονάδας.

Το μοντέλο Jensen είναι το μοντέλο ομόρρου που χρησιμοποιείται στο WasP και επίσης εμπεριέχεται στο λογισμικό Garrad Hassan (GH) WindFarmer. Μέχρι την ενημέρωση 2.5 ήταν το μόνο μοντέλο ελλείμματος ταχύτητας που ήταν διαθέσιμο στο WindPRO. Στην ενημέρωση 2.5 εισάχθηκαν και αρκετά άλλα μοντέλα με ένα από αυτά να είναι μια παραλλαγμένη εκδοχή του Jensen. Η παραλλαγμένη αυτή εκδοχή επιτρέπει στο μοντέλο Jensen να δουλεύει παράλληλα με μοντέλα τύρβης τα οποία έχουν επίσης εισαχθεί στο WindPRO 2.5. Εκτός από αυτό οι αλγόριθμοι που διαχειρίζονται πολλαπλούς ομόρρους έχουν αλλάξει. Αρχικά το μοντέλο Jensen στο WindPRO ήταν ρυθμισμένο έτσι ώστε να παράγει αποτελέσματα που να προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του WasP. Στο τροποποιημένο μοντέλο Jensen(2005), χρησιμοποιείται η μέθοδος συνδυασμού ομόρρων που περιγράφεται τον Katic (Katic, Højstrup, & &

Jensen, 1987). Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό αιολικών πάρκων που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες με διαφορετικά ύψη και διαφορετικού τύπους γεννητριών.

### 2.2.2 Μοντέλο G.C. Larsen

Το μοντέλο που δημιούργησε ο Gunner C. Larsen το 1988 (Larsen, A simple wake calculation procedure (pp. 1-53), 1988) (θα αναφερόμαστε σε αυτό ως μοντέλο Larsen) είναι βασισμένο στις εξισώσεις τυρβώδους οριακού στρώματος του Prandtl και έχει κλειστής μορφής λύσεις για το πλάτος και το μέσο προφίλ ταχύτητας του ομόρρου. Για να αποκτηθούν αυτές οι λύσεις θα πρέπει να θεωρηθεί ένα προφίλ ομοιότητας ταχύτητας και να χρησιμοποιηθεί η θεωρία μήκους ανάμιξης του Prandtl. Επίσης η ροή θεωρείται ασυμπίεστη και μόνιμη, και αγνοείται το wind shear επομένως η ροή είναι αξονοσυμμετρική.

Ο Larsen εισήγαγε μια πρώτη και μια δεύτερης τάξης προσεγγιστικές λύσεις για τις εξισώσεις οριακού στρώματος. Σε αυτή την περιγραφή του μοντέλου θα παρουσιαστούν οι λύσεις πρώτης τάξης και στο κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστούν οι λύσεις 2<sup>ης</sup> τάξης.

Παρακάτω εμφανίζονται εν συντομία οι πρώτης τάξης εξισώσεις που υπολογίζουν το έλλειμμα ταχύτητας και την ακτίνα ομόρρου αναλόγως την απόσταση από το δρομέα της ανεμογεννήτριας.

$$R_w(x) = \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{1}{5}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} (C_T A(x + x_0))^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_1(x, r) = & -\frac{U_\infty}{9} (C_T A(x + x_0))^{-2} \left[ r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A(x + x_0))^{-\frac{1}{2}} \right. \\ & \left. + \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{3}{10}} (3c_1^2)^{-\frac{1}{5}} \right]^{-2} \quad (2.5) \end{aligned}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις παραμένουν ίδιες σε όλες τις παραλλαγές του μοντέλου GCL που μπορεί να συναντήσει κανείς. Υπάρχουν όμως ακόμα δυο άγνωστες σταθερές οι οποίες είναι η  $c^1$  η οποία σχετίζεται με το μήκος ανάμειξης Prandtl και τη θέση του ρότορα σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων που εφαρμόζεται  $x_0$ . Ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων είναι που διαφοροποιεί τις παραλλαγές μεταξύ τους. Ο λόγος που μπορεί να αλλάζει ο τρόπος υπολογισμού αυτών των παραμέτρων στο μοντέλο είναι διότι αυτός ο υπολογισμός προκύπτει από την εφαρμογή οριακών συνθηκών για τον ομόρρου μιας ανεμογεννήτριας και είναι ανοικτές σε διάφορες ερμηνείες. Οι σχέσεις που παρουσιάζονται παρακάτω είναι οι ίδιες με αυτές που δίνονται από το ευρωπαϊκό πρότυπο αιολικής ενέργειας II (EWTSII) που εισηγήθηκε το 1998 και εφαρμόζονται επίσης και από το λογισμικό WindPRO.

$$c_1 = \left[ \frac{D_{eff}}{2} \right]^{\frac{5}{2}} \left( \frac{105}{2\pi} \right)^{-\frac{1}{2}} (C_T A x_0)^{-\frac{5}{6}} \quad (2.6)$$

$$x_0 = \frac{9.5D}{\left(\frac{2R_{9.5}}{D_{eff}}\right)^3 - 1} \quad (2.7)$$

Η παράμετρος  $D_{eff}$  ονομάζεται αποτελεσματική διάμετρος δρομέα (effective rotor diameter) και δίνεται από:

$$D_{eff} = D \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}}} \quad (2.8)$$

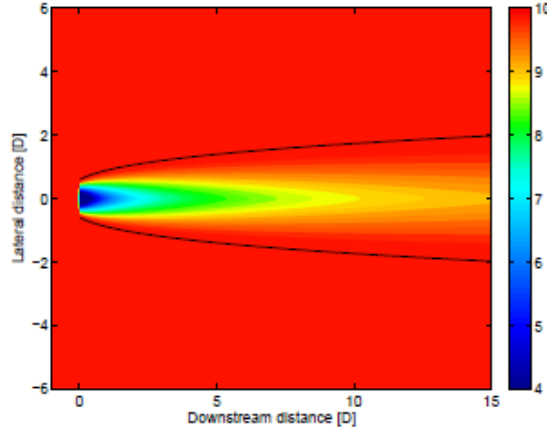
και η ακτίνα ομόρρου σε απόσταση 9.5 διαμέτρων δρομέα καάντι της ανεμογεννήτριας  $R_{9.5}$  δίνεται ως:

$$R_{9.5} = 0.5[R_{nb} + \min(H, R_{nb})] \quad (2.9)$$

όπου η παράμετρος  $R_{nb}$  δίνεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$R_{nb} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05)) \quad (2.10)$$

Η εξίσωση (2.9) λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό που μας επιβάλλει το έδαφος στην περίπτωση που η ακτίνα του ομόρρου είναι μεγαλύτερη από το ύψος της ανεμογεννήτριας. Εκτός από τις συντεταγμένες  $x, r$  το μοντέλο του Larsen εξαρτάται και από το συντελεστή ώσης  $C_T$ , την αδιατάραχτη ταχύτητα ανέμου περιβάλλοντος  $U_\infty$ , τη διάμετρο δρομέα  $D$ , το ύψος του hub της ανεμογεννήτριας  $H$ , και το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος  $I_a$ . Ένα παράδειγμα της εξέλιξης της αξονικής ροής πίσω από μια ανεμογεννήτρια υπολογιζόμενη από το μοντέλο Larsen φαίνεται παρακάτω. Στην εικόνα το όριο του ομόρρου που δίνεται από την τιμή  $R_w$  φαίνεται από την μαύρη γραμμή.



Εικόνα 2.2 Προφίλ ομόρρου με το μοντέλο Larsen (Renkema, 2007)

### 2.2.3 Αναλυτικό μοντέλο Frandsen

Μια πιο πρόσφατη μέθοδος από τις μεθόδους Jensen και Larsen είναι το Stormpark Analytical Model (SAM) που παρουσιάστηκε στο ευρωπαϊκό συνέδριο και έκθεση αιολικής ενέργειας (European Wind Energy Conference and Exhibition 2006). Αν και το SAM έχει σχεδιαστεί για να προβλέπει το έλλειμμα ταχύτητας σε μεγάλα

θαλάσσια αιολικά πάρκα με τετραγωνισμένη χωροθέτηση και σταθερές αποστάσεις μεταξύ σειρών, καταβάλλεται προσπάθεια να γίνει κατάλληλο και για ακανόνιστα χωροθετημένα πάρκα. Αυτό είναι βέβαια προϋπόθεση για να καταστεί το μοντέλο βιώσιμο σε υπολογισμούς γενικών αιολικών πάρκων.

Το μοντέλο διαχωρίζει τον ομόρρου σε 3 διαφορετικές περιοχές. Η πρώτη περιοχή ορίζεται ως η περιοχή όπου υπάρχει μόνο ο ομόρρος της ανεμογεννήτριας που τον παράγει και δεν υπάρχουν ακόμα αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών γεννητριών. Η δεύτερη περιοχή ξεκινάει εκεί που αρχίζει η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο γειτονικών ομόρρων. Σε αυτή την περίπτωση η ανάπτυξη του ομόρρου περιορίζεται σε ανάπτυξη κατά την κάθετη κατεύθυνση μόνο. Τέλος η Τρίτη και τελευταία περιοχή αρχίζει όταν ο ομόρρος είναι σε ισορροπία με το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, που είναι το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας. Αυτό συμβαίνει αν θεωρήσουμε το αιολικό πάρκο ως απείρων διαστάσεων.

Παρόμοια με το μοντέλο Jensen, το έλλειμμα ταχύτητας στον ομόρρου θεωρείται ως σχήματος καπέλου (hat shaped). Αρχικά στο SAM η διάμετρος του ομόρρου δίνεται ως:

$$D_{w(x)} = D \left( \beta^{\frac{k}{2}} + as \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.11)$$

με την παράμετρο ανάπτυξης  $\beta$  να είναι:

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}} = \left( \frac{D_{eff}}{D} \right)^2 \quad (2.12)$$

και τις τιμές του  $k$  και  $a$  να είναι 2 και 0.7 αντίστοιχα. Αργότερες μελέτες έδειξαν ότι μια διαφορετική περιγραφή της διαμέτρου προσέγγιζε καλύτερα στις μετρήσεις του μακρινού ομόρρου.

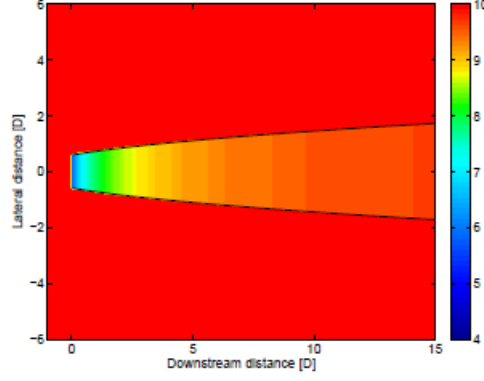
$$D_w(x) = D \max[\beta, as]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Παρόλα αυτά η χρήση της σχέσης 2.13 οδηγεί σε ασυνέχεια της διαμέτρου του ομόρρου στον κοντινό ομόρρου.

Σε ένα μόνο ομόρρου χωρίς αλληλεπιδράσεις το έλλειμμα ταχύτητας θεωρείται σταθερό και δίνεται από:

$$u = \frac{U_\infty}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{2A}{A_w} C_T} \right) \quad (2.14)$$

όπου το πρόσημο του  $\pm$  μέσα στην παρένθεση εξαρτάται από την τιμή του  $C_T$ . Η αξονική ταχύτητα υπολογιζόμενη από αυτό το μοντέλο φαίνεται στην εικόνα (2.3).



Εικόνα 2.3 Προφίλ ομόρρου με το μοντέλο Frandsen

Στην περίπτωση επικάλυψης ομόρρων ο ομόρρος διαιρείται σε πολλαπλά κομμάτια που ονομάζονται μωσαϊκά τετράγωνα και κάθε ένα έχει σταθερό αλλά διαφορετικό έλλειμμα ταχύτητας από τα άλλα. Για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας σε όλη την επιφάνεια του δίσκου χρησιμοποιείται μια ημιγραμμική μέθοδος. Για περισσότερες πληροφορίες επί της μεθόδου αυτής μπορείτε να δείτε τη μελέτη από τον Rathmann et al. (Rathmann, Barthelmie, & Frandsen, 2006, February).

#### 2.2.4 Μοντέλο Abramovich

Το μοντέλο Abramovich βασίζεται στη θεωρία δέσμης ρευστού και σύμφωνα με αυτό ο ομόρρος της ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε 3 περιοχές. Τον πυρήνα, την περιοχή αδιατάρακτης ροής και μια ενδιάμεση περιοχή. Το προφίλ ταχύτητας μέσα στον ομόρρο δίνεται παρακάτω:

$$U(x, r) = \begin{cases} U & \text{για } r > R(x) \\ U_T & \text{για } 0 < x < x_c, \quad r < R_c(x) \\ U - U_s [(1 - \xi(x)^{1.5})^2] & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.15)$$

Όπου  $\xi(x)$  είναι μια αδιάστατη συντεταγμένη και ορίζεται ως

$$\xi(x) = \begin{cases} \frac{r - R_c(x)}{R(x) - R_c(x)} & \text{για } 0 < x < x_c \text{ και } R_c(x) < r < R(x) \\ \frac{r}{R(x)} & \text{για } x < x_c \text{ και } 0 < R(x) \end{cases} \quad (2.16)$$

Η ταχύτητα που επικρατεί στον δυναμικό πυρήνα δίνεται μέσω της εμπειρικής σχέσης

$$U_T = U \sqrt{1 - C_t} \quad (2.17)$$

Όσον αφορά το προφίλ του ομόρρου αποτελείται από δυο όρους που αντιπροσωπεύουν την τύρβη της ροής περιβάλλοντος και την τύρβη που παράγεται

από την περιστροφή του δρομέα. Η ακτίνα του ομόρρου σε απόσταση  $x$  περιγράφεται παρακάτω:

$$R(x) = R_0 + x \left( \left( \frac{a}{0.51} \right)^2 + \left( \frac{0.22(m-1)^2}{m^2 - 4m + 1} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (2.18)$$

Όπου  $a$  είναι σταθερά που εξαρτάται από την ένταση τύρβης περιβάλλοντος και

$$m = \frac{U}{U_T} \quad (2.19)$$

είναι σταθερά που εξαρτάται από την ενέργεια που απορροφά ο δρομέας.

### 2.3 Μοντέλα Πεδίου

Εκτός από την πρώτη κατηγορία μοντέλων που είδαμε παραπάνω υπάρχουν και τα μοντέλα πεδίου τα οποία αντιμετωπίζουν το πρόβλημα λύνοντας τις εξισώσεις της ορμής και της συνέχειας σε ολόκληρο το πεδίο ροής διαμέσου ενός αιολικού πάρκου με τη χρήση της λογικής πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα πεδίου λύνουν τις εξισώσεις Navier -Stokes σταθμισμένες κατά Reynolds με ένα μοντέλο τύρβης για κλείσιμο. Το κεφάλαιο αυτό θα περιγράψει τα πιο δημοφιλή μοντέλα τα οποία χωρίζονται σε δυο και τριών διαστάσεων.

#### 2.3.1 Δυσδιάστατα μοντέλα

Τα δυσδιάστατα μοντέλα υποθέτουν αξονική συμμετρία στον ομόρρο. Επειδή αυτό οδηγεί σε λιγότερες εξισώσεις που πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα, χρειάζεται λιγότερος χρόνος για τον υπολογισμό του πεδίου ροής. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον J.F. Ainslie (Ainslie, 1988) και αρκετά μοντέλα είναι βασισμένα σε αυτήν.

Το μοντέλο του J. F. Ainslie, στο οποίο θα αναφερόμαστε ως μοντέλο Ainslie, χρησιμοποιεί αξονοσυμμετρικές, χρονικά σταθμισμένες εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή με ιξώδες eddy για να υπολογίσει την συμπεριφορά του ομόρρου. Η εξίσωση συνέχειας σε κυλινδρικές συντεταγμένες δίνεται ως:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.20)$$

και η εξίσωση της ορμής σε κατεύθυνση ελεύθερης ροής ως

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{1}{r} \frac{\partial(r \overline{u'v'})}{\partial r} \quad (2.21)$$

Οι τάσεις Reynolds μοντελοποιημένες με το ιξώδες eddy

$$-\overline{u'v'} = \varepsilon(x) \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2.22)$$

Ο Ainslie διαίρεσε το ιξώδες eddy σε ιξώδες eddy περιβάλλοντος της ατμοσφαιρικής ροής και ιξώδες eddy παραγόμενο από το wind shear του ομόρρου.

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_a + \varepsilon_w(x) \quad (2.23)$$

Οπού το κομμάτι που παράγεται από το wind shear του ομόρρου δίνεται ως

$$\varepsilon_w(x) = kb(U_\infty - u_c(x)) \quad (2.24)$$

και εξαρτάται από το πλάτος του ομόρρου  $b$ , το έλλειμμα ταχύτητας στην αξονική γραμμή  $(U_\infty - u_c(x))$  και την εμπειρική σταθερά  $k$  που έχει βρεθεί να είναι 0.015.

Μια από τις απλοποιήσεις του μοντέλου είναι ότι τα gradient πίεσης στον ομόρρου αγνοούνται. Αυτή η παραδοχή ωστόσο είναι λανθασμένη στις περιοχές ακριβώς πίσω από τον δρομέα και για αυτό το μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις περιοχές αυτές. Έτσι το μοντέλο πρέπει να αρχικοποιηθεί ώστε να ξεκινάει μετά το κοντινό ομόρρου θεωρώντας ένα εμπειρικό προφίλ ομόρρου. Ο Ainslie θεώρησε το μήκος του κοντινού ομόρρου να είναι 2 διαμέτρους και χρησιμοποίησε ένα γκαουσιανό προφίλ για το έλλειμμα ταχύτητας.

$$1 - \frac{u}{U_\infty} = (U_\infty - u_c) \exp\left(-3.56 \left(\frac{r}{b}\right)^2\right) \quad (2.25)$$

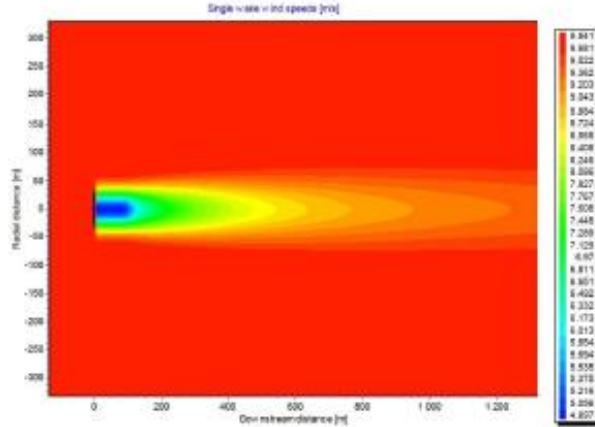
Το αρχικό έλλειμμα ταχύτητας στην αξονική γραμμή του ομόρρου βρέθηκε

$$(U_\infty - u_c) = C_T - 0.05 - (16C_T - 0.5) \frac{I}{10} \quad (2.26)$$

βασισμένο σε μελέτες αεροδυναμικής σήραγγας και το πλάτος ομόρρου  $b$  (ορισμένο ως η απόσταση στην οποία το έλλειμμα ταχύτητας είναι 2.83% της αξονικής τιμής) βρέθηκε από την εξίσωση διατήρησης της ορμής να είναι

$$b = \sqrt{\frac{3.56C_T}{4(u_\infty - u_c)(2 - (u_\infty - u_c))}} \quad (2.27)$$

Ένα παράδειγμα της ανάπτυξης της αξονικής ταχύτητας στον ομόρρου κατάντι μιας ανεμογεννήτριας υπολογισμένης από το μοντέλο του Ainslie φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 2.4 Προφίλ ομόρρου με το μοντέλο Ainslie (Renkema, 2007)

Το μοντέλο του Ainslie εφαρμόζεται όπως παρουσιάστηκε στο λογισμικό WindPRO αλλά υπάρχουν και παραλλαγές του που εφαρμόζονται σε άλλα λογισμικά. Για παράδειγμα στο εμπορικά διαθέσιμο πακέτο λογισμικού WindFarmer το μοντέλο Ainslie εφαρμόζεται ως το Garrad Hassan Eddy Viscosity Wake Model και το πρόγραμμα Farm Layout Program (FLaP) που δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Oldenburg είναι επίσης βασισμένο στο μοντέλο του Ainslie.

### 2.3.2 Τρισδιάστατα μοντέλα πεδίου

#### WAKEFARM

Το μοντέλο WAKEFARM είναι μια παραλλαγή του μοντέλου ομόρρου UPMWAKE του πολυτεχνείου της Μαδρίτης και δημιουργήθηκε από το ECN.

Το wakefarm είναι ένα τρισδιάστατο παραβολικό μοντέλο κώδικα Navier-Stokes για το μακρινό ομόρρου που χρησιμοποιεί ένα k-ε μοντέλο τύρβης. Για να μοντελοποιηθεί ο κοντινός ομόρρους χρησιμοποιείται θεωρία της ορμής μαζί με κάποιες εμπειρικές διορθώσεις. Αρχικά ο μακρινός ομόρρους αρχικοποιήθηκε με ένα προφίλ καπέλου (hat shaped) έλλειμμα ταχύτητας στις 2.25 διαμέτρους δρομέα κατάντι της ανεμογεννήτριας (αυτή είναι η κύρια διαφορά μεταξύ του wakefarm και του αρχικού upmwake που θεωρεί τον ομόρρου πλήρως ανεπτυγμένο ακριβώς μετά τον δρομέα). Αυτό το προφίλ καπέλου αργότερα άλλαξε σε γκαουσιανό προφίλ ελλείμματος ταχύτητας.

Το αρχικό προφίλ ομόρρου που χρησιμοποιήθηκε δίνεται παρακάτω

$$u_{initial}(y, z) = 1.3(1 - \sqrt{1 - C_T})U_{\infty} \left( e^{\left(-0.5\left(\frac{y}{r\sigma_y}\right)^2\right)} e^{-0.5\left(\frac{z-H}{r\sigma_z}\right)^2} \right) \quad (2.28)$$

όπου  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  έχουν ανάλογα με τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής σήραγγας να είναι ίσα με



$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}}$$

και το  $\alpha$  δίνεται ως (2.29)

$$\alpha = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_T}) \quad (2.30)$$

### Ελλειπτικά μοντέλα πεδίου

Αρκετά ελλειπτικά μοντέλα πεδίου έχουν δημιουργηθεί για να μελετήσουν τη ροή που αφορά ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα. Σε αυτά τα μοντέλα οι ανεμογεννήτριες μοντελοποιούνται είτε ως δίσκοι (Ammara, Leclerc, & Masson, 2002) είτε ως γραμμές (Mikkelsen & Sørensen, 2004) και (Troldborg, Sørensen, & Mikkelsen, 2006). Αν και αυτά τα μοντέλα υπολογίζουν σε μεγάλη λεπτομέρεια την ροή στον κοντινό ομόρρου είναι πολύ απαιτητικά σε υπολογιστική ισχύ. Στην περίπτωση του Mikkelsen εξέτασε μόνο μια ανεμογεννήτρια, ο Troldborg et. Al μια σειρά από 3 ανεμογεννήτριες και ο Ammara ένα αιολικό πάρκο δυο γραμμών.

Το πανεπιστήμιο Robert Gordon (RGU) χρησιμοποίησε τρισδιάστατο κώδικα Navier-Stokes με μοντελοποίηση τύρβης k-ε κατά τη διάρκεια του ENDOW project. Χρειάστηκαν περίπου 12 ώρες υπολογισμού το 2001 (Schepers, Barthelmie, Rados, Lange, & Schlez, 2001) σε αντίθεση με τα δευτερόλεπτα ή λεπτά που χρειάστηκαν για άλλα μοντέλα ενώ ταυτόχρονα δεν παρήχθησαν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα. Για γενικούς υπολογισμούς αιολικών πάρκων και για διάφορες πιθανές χωροθετήσεις, η χρησιμοποίηση ελλειπτικών μοντέλων δεν είναι ακόμα ρεαλιστική.

Κατά τη μελέτη επικύρωσης που λέγεται ENDOW πολλά από αυτά τα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί.

## 2.4 Αυτόνομα μοντέλα τύρβης

Όπως ειπώθηκε νωρίτερα, τα κινηματικά μοντέλα ομόρρου πρέπει να συνδυαστούν με μοντέλα τύρβης όταν χρησιμοποιούνται για υπολογισμούς φορτίων ή και εφόσον χρειάζονται γενικά τα δεδομένα της τύρβης της ροής. Τα διαθέσιμα μοντέλα στο λογισμικό WindPRO και αυτά τα οποία θα παρουσιάσουμε είναι τα Danish Recommendation (DR), Larsen, Frandsen ή αλλιώς DIBt, και το Quarton/TNO μοντέλο τύρβης.

### 2.4.1 Danish Recommendation

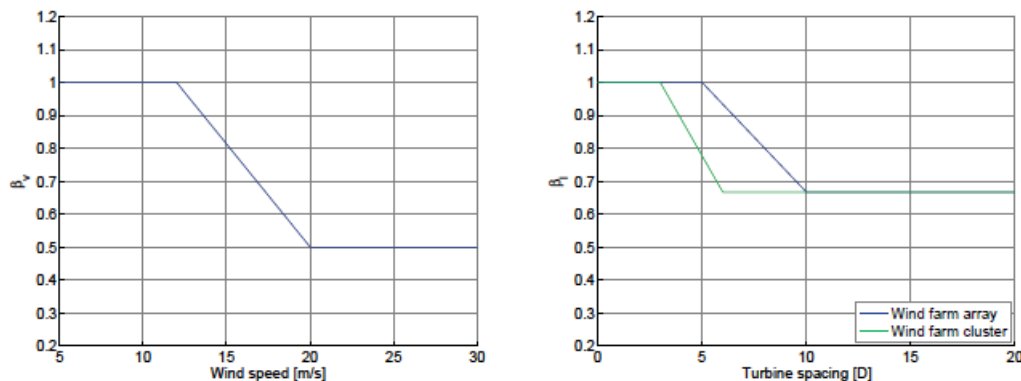
Το μοντέλο επονομαζόμενο ως Danish Recommendation περιγράφει ένα επίπεδο τύρβης  $I_d$  το οποίο κανονικοποιείται με βάση τη μέση ταχύτητα ανέμου περιβάλλοντος στο ύψος του δρομέα.

$$I_d = \sqrt{I_a^2 + I_w^2} \quad (2.31)$$

στο οποίο η επιπρόσθετη τύρβη λόγω ομόρρου  $I_w$  ορίζεται ως

$$I_w = 0.15 \beta_v \beta_l \quad (2.32)$$

όπου  $\beta_v$  και  $\beta_i$  είναι διορθωτικοί παράγοντες σχετιζόμενοι με τα ταχύτητα ανέμου και τη διαρρύθμιση του αιολικού πάρκου και μπορούν να αποκτηθούν από την εικόνα (). Χρησιμοποιώντας αυτούς τους δυο διορθωτικούς παράγοντες μπορούμε να δούμε ότι η τιμή του  $I_w$  κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.066 και 0.15.



Εικόνα 2.5 Διορθωτικός συντελεστής ταχύτητας ανέμου (αριστερά) και αποστάσεως γεννητριών (δεξιά) για το μοντέλο Danish Recommendation (Renkema, 2007)

#### 2.4.2 Μοντέλο Larsen

Το μοντέλο τύρβης Larsen είναι το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής σε συνδυασμό με το κινηματικό μοντέλο του Larsen για τον υπολογισμό της κατάστασης της ροής στο υφιστάμενο λογισμικό του εργαστηρίου. Βασίζεται στις υποθέσεις ότι μόνο surface και wake shear μηχανισμοί συνεισφέρουν σημαντικά στην παραγωγή τύρβης και ότι αυτοί οι μηχανισμοί είναι στατιστικά ανεξάρτητοι, και άρα προσθέσιμοι. Το κομμάτι του συνολικού επιπέδου τύρβης στον ομόρρου στην κατεύθυνση του αδιατάραχτου ανέμου δίνεται ως

$$I_{wt}^u = \sqrt{I_a^2 + I_w^2} \quad (2.33)$$

Η παραγωγή τύρβης λόγω ομόρρου (για αποστάσεις μεγαλύτερες των 2 διαμέτρων δίνεται ως

$$I_w = 0.29s^{-\frac{1}{3}} \sqrt{1 - \sqrt{1 - C_T}} \quad (2.34)$$

#### 2.4.3 Μοντέλο Frandsen/DIBt

Το μοντέλο Frandsen και το Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) μοντέλο είναι πανομοιότυπα. Στο λογισμικό WindPRO δίνονται ως ξεχωριστές επιλογές κυρίως διότι χρήστες στην Γερμανία είναι περισσότερο εξοικειωμένοι με την ονομασία DIBt. Το μοντέλο θεωρεί ότι αν η μικρότερη απόσταση μεταξύ δυο ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο είναι μεγαλύτερη από 10 διαμέτρους ρότορα, οι επιδράσεις ομόρρου σε μορφή παραγόμενης τύρβης αγνοούνται. Όμως σε διαφορετική περίπτωση, οι επιδράσεις ομόρρου λόγω παραγόμενης τύρβης πρέπει να υπολογιστούν όπως

παρακάτω. Το επίπεδο τύρβης σε έναν ομόρρου, που ο Frandsen αποκαλεί 'effective turbulence' (αποτελεσματική τύρβη) δίνεται ως

$$I_{eff} = \left[ (1 - p_w N) I_a^m + p_w N \sum_{i=1}^N I_T^m(s_i) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2.35)$$

όπου  $m$  είναι το εκθετικό της καμπύλης Wohler και εξαρτάται από το υλικό του υπο εξέταση εξαρτήματος.

$N$  είναι ο αριθμός των γειτονικών ανεμογεννητριών

$p_w$  είναι η πιθανότητα ομόρρου και δίνεται ως 0.04

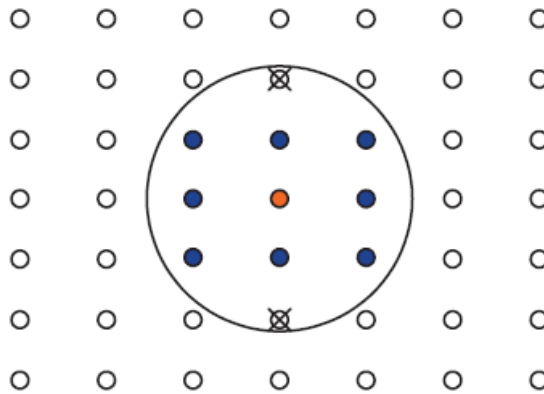
$s_i$  είναι η απόσταση με την γειτονική ανεμογεννήτρια  $i$

$I_a$  είναι το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος

Και το μέγιστο επίπεδο τύρβης στην αξονική γραμμή  $I_T$  δίνεται ως

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{1.5 + 0.3 s_i \sqrt{U_\infty}} + I_a^2} \quad (2.36)$$

Ο ομόρρος της 2<sup>ης</sup> ανεμογεννήτριας σε σειρά ανάντι της εξεταζόμενης γεννήτριας δεν λαμβάνεται υπόψιν. Έτσι σε τετραγωνισμένο πλέγμα ο αριθμός των γειτονικών ανεμογεννητριών είναι μέχρι 8, βλέπε εικόνα().



**Εικόνα 2.6** Αποτύπωση των ανεμογεννητριών που λαμβάνονται υπόψιν με το μοντέλο Frandsen/DIBt σε συνθήκες αιολικού πάρκου. (Renkema, 2007)

Σε μεγάλα αιολικά πάρκα όπου μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από 5 ανεμογεννήτριες μεταξύ της εξεταζόμενης και της άκρης του πάρκου, ή όταν οι ανεμογεννήτριες είναι διεσπαρμένες με αποστάσεις μικρότερες από 3 διαμέτρους ρότορα μεταξύ τους στην κατεύθυνση που είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διαφορετική τιμή για το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος  $I_a$ .

$$I'_a = \frac{1}{2} \left( \sqrt{I_w^2 + I_a^2} + I_a \right) \quad (2.37)$$

όπου

$$I_w = \frac{0.36}{1 + 0.2 \sqrt{\frac{s_r s_f}{C_T}}} \quad (2.38)$$

Οι τιμές  $s_r$  και  $s_f$  είναι οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ των στηλών και μεταξύ των σειρών αντίστοιχα.

#### 2.4.4 Μοντέλα Quarton/TNO

Η παραγόμενη από τον ομόρρου τύρβη στα μοντέλα Quarton και TNO δίνεται ως εξής:

$$I_w = K_1 C_T^{a1} I_a^{a2} \left( \frac{x}{x_n} \right)^{a3} \quad (2.39)$$

Βασισμένος σε δεδομένα αεροδυναμικής σήραγγας ο Quarton πρότεινε μια παραλλαγή στις παραμέτρους του μοντέλου του όπως φαίνεται παρακάτω. Οι τιμές των παραμέτρων για τα διαφορετικά μοντέλα δίνονται από τον πίνακα ().

Μοντέλο Τύρβης	$K1$	$a1$	$a2$	$a3$
Quarton πρωτότυπο	4.8	0.7	0.68	-0.57
Quarton εναλλακτικό	5.7	0.7	0.68	-0.96
TNO0	1.31	0.7	0.68	-0.96

Πίνακας 2.1 Τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα Quarton, Quarton alternative και TNO

Το μοντέλο TNO μοντέλο απαιτεί το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος να είναι κλάσμα ενώ το μοντέλο Quarton ποσοστό. Συνδυάζοντας αυτό με τη διαφορά στις παραμέτρους μπορεί να υπολογιστεί εύκολα ότι η μόνη διαφορά μεταξύ του εναλλακτικού μοντέλου Quarton και του TON είναι ο ορισμός του μήκους του κοντινού ομόρρου.

$$\frac{I_{wQuarton}}{I_{wTNO}} = \frac{5.7}{1.31} * \frac{100^{0.68}}{1^{0.68}} \left( \frac{x_{nTNO}}{x_{nQuarton}} \right)^{-0.96} = \left( \frac{x_{nTNO}}{x_{nQuarton}} \right)^{-0.96} \quad (2.40)$$

### 2.4.5 Μοντέλο Lange

Μόνο διαθέσιμο σε συνδυασμό με το μοντέλο του Ainslie, το μοντέλο τύρβης Lange μοντελοποιεί το επίπεδο τύρβης που παράγεται από wind shear χρησιμοποιώντας το ιξώδες eddy όπως στο FLAP.

$$I_{mean} = \varepsilon \frac{2.4}{k u_{\infty} H} \quad (2.41)$$

### 2.4.6 Μοντέλο ForWind

Όλα τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα στο WindPRO θεωρούν ότι το επίπεδο τύρβης στον ομόρρου είναι σταθερό για δεδομένη απόσταση κατάντι του δρομέ, ακριβώς όπως κάνει το μοντέλο του Jensen για το έλλειμμα ταχύτητας. Παρόλα αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό τύρβης παράγεται κοντά στην περιοχή του δρομέα και στις άκρες των πτερυγίων. Σε δεδομένη απόσταση κατάντι ένα γκαουσιανό προφίλ παραμένει λόγω διάχυσης. Για να μοντελοποιήσει αυτό το προφίλ τύρβης το ForWind δημιούργησε ένα νέο μοντέλο και το παρουσίασε στο συνέδριο EWEC το 2006.

Στο μοντέλο του ForWind η παραγόμενη από τον ομόρρου τύρβη αποτελείται από ένα κομμάτι που οφείλεται στο shear και ένα κομμάτι που οφείλεται στην διάχυση. Η ταχύτητα μέσα στον ομόρρου θεωρείται αξονοσυμμετρική και έτσι το μοντέλο αυτό δεν θα έπρεπε να συνδυαστεί με τα μοντέλα Jensen ή Frandsen που συζητήθηκαν παραπάνω. Χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση για το αξονικό έλλειμμα ταχύτητας

$$\tilde{u}(r, x) = 1 - \frac{u(r, x)}{U_{\infty}} \quad (2.42)$$

η παραγόμενη τύρβη δίνεται ως

$$I_{add}(r, x) = I_{shear}(\tilde{u}(r, x)) + I_{diff}(\tilde{u}(r, x)) \quad (2.43)$$

Τα κομμάτια που οφείλονται στο shear και στη διάχυση δίνονται παρακάτω

$$I_{shear}(\tilde{u}(r, x)) = A I_{mean}(x) \frac{\partial \tilde{u}(r, x)}{\partial \left(\frac{r}{R}\right)} \quad (2.44)$$

$$I_{diff}(\tilde{u}(r, x)) = B \tilde{u}(r, x) \quad (2.45)$$

Όπου A και B είναι εμπειρικά υπολογιζόμενες σταθερές.

Για να υπολογιστεί το  $I_{mean}$  οι εξισώσεις (2.41), (2.23) και (2.27) χρησιμοποιούνται και καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση

$$I_{mean}(x) = I_a + \frac{2.4}{k U_{\infty} z_H} k R_w(x) [U_{\infty} - u_c(x)] \quad (2.46)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3 Μοντέλο Gunner C Larsen και εφαρμογή του

#### 3.1 Παραλλαγές EWTSII και GCL 2009

Ο Gunner Christian Larsen εισήγαγε ένα ημιεμπειρικό κινηματικό μοντέλο ομόρρου ανεμογεννητριών για πρώτη φορά το 1988 εκ μέρους του εθνικού εργαστηρίου Riso της Δανίας (Larsen, A simple wake calculation procedure (pp. 1-53), 1988). Έκτοτε το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί και έχει υποστεί διάφορες παραλλαγές. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η παραλλαγή που χρησιμοποιήθηκε στο ευρωπαϊκό πρότυπο αιολικής ενέργειας (EWTSII) (Pierik, et al., 1999, March) και μια παραλλαγή που εισήγαγε ο ίδιος ο Larsen το 2009 (Larsen, A simple stationary semi-analytical wake model, 2009) ως αναβάθμιση του δικού του μοντέλου.

Αυτές οι παραλλαγές στο αρχικό μοντέλο έχουν να κάνουν με τον υπολογισμό των σταθερών που προέκυψαν μετά την λύση των διαφορικών εξισώσεων. Αυτός ο υπολογισμός γίνεται εφαρμόζοντας συνθήκες που προκύπτουν συνήθως με εμπειρικό ή ημιεμπειρικό τρόπο.

Στην περίπτωση του μοντέλου του ευρωπαϊκού προτύπου αιολικής ενέργειας στο οποίο θα αναφερόμαστε από εδώ και στο εξής ως μοντέλο EWTSII η πρώτη συνθήκη είναι ότι η διάμετρος ομόρρου στο σημείο του ρότορα είναι ίση με τη διάμετρο του ρότορα, και η δεύτερη συνθήκη είναι ότι η διάμετρος του ομόρρου σε απόσταση  $9.5$  διαμέτρων από τον ρότορα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση  $R_{9.5} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05))$  όπου  $D$  είναι η διάμετρος του ρότορα και  $I_a$  το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος.

Αρχικά σε όλες τις παραλλαγές του μοντέλου Larsen οι δυο κύριες εξισώσεις που απαρτίζουν την λύση πρώτης τάξης (παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο καταγραφής υπαρχόντων μοντέλων) παραμένουν ως έχουν:

$$R_w(x) = \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{1}{5}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} (C_T A(x + x_0))^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_1(x, r) = & -\frac{U_\infty}{9} (C_T A(x + x_0))^{-2} \left[ r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A(x + x_0))^{-\frac{1}{2}} \right. \\ & + \left. -\left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{3}{10}} (3c_1^2)^{-\frac{1}{5}} \right]^{-2} \quad (2.5) \end{aligned}$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι σχέσεις που υπολογίζουν τις παραμέτρους  $x_0$  και  $R_{nb}$  στην παραλλαγή EWTSII οι οποίες έχουν υπολογιστεί με βάση τις δυο συνθήκες που αναφέραμε παραπάνω.

$$x_0 = \frac{9.5D}{\left(\frac{2R_{9.5}}{D_{eff}}\right)^3 - 1} \quad (2.7)$$

$$R_{nb} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05)) \quad (2.10)$$

$$R_{9.5} = 0.5[R_{nb} + \min(H, R_{nb})] \quad (2.9)$$

Η εξίσωση 2.9 έχει σκοπό να περιορίζει τη ακτίνα του ομόρρου σε απόσταση 9.5 διαμέτρων στο ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Στην παραλλαγή του αναθεωρημένου μοντέλου Larsen του 2009 θα αναφερόμαστε από εδώ και πέρα ως μοντέλο 2009 η πρώτη συνθήκη θα είναι όπως και στο μοντέλο EWTSII ότι η διάμετρος του ομόρρου στο σημείο του ρότορα είναι ίση με τη διάμετρο του ρότορα. Η δεύτερη συνθήκη όμως η οποία δημιουργήθηκε εμπειρικά όπως και στο μοντέλο EWTSII είναι ότι η ακτίνα του ομόρρου στις 9.6 διαμέτρους είναι η παρακάτω.

$$R_{9.6} = \alpha_1 \exp(a_2 C_T^2 + a_3 C_T + a_4) (b_1 I_a + 1) D \quad (2.47)$$

Όπου  $I_a$  είναι το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος και  $\alpha_1$ - $\alpha_4$ ,  $b_1$  εμπειρικά διαμορφωμένες παράμετροι που δίνονται ως

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.435449861 \\ \alpha_2 &= 0.797853685 \\ \alpha_3 &= -0.124807893 \\ \alpha_4 &= 0.136821858 \\ b_1 &= 15.6298 \end{aligned} \quad (2.48)$$

Εκτός από τις παραπάνω σχέσεις αλλάζει ελάχιστα και η εξίσωση που δίνει το  $x_0$

$$x_0 = \frac{9.6D}{\left(\frac{2R_{9.6}}{D_{eff}}\right)^3 - 1} \quad (2.49)$$

### 3.2 Λύση 2ης τάξης

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο το μοντέλο του Larsen παράγει ένα γκαουσιανό προφίλ ταχύτητας ομόρρου σε αντίθεση με το hat shaped προφίλ που παράγει το απλό μοντέλο Jensen. Το μοντέλο Larsen μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλαπλών τάξεων λύσεις στις εξισώσεις οριακού στρώματος για να προσεγγίσει το έλλειμμα ταχύτητας εντός του ομόρρου αλλά οι λύσεις που ξεπερνούν την δεύτερη τάξη έχουν μηδαμινή επίδραση στα αποτελέσματα Έτσι στον προγραμματισμό του

μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης λύσεις. Η λύση πρώτης τάξης παρουσιάστηκε στο παρόν και στο προηγούμενο κεφάλαιο (2.1.2) και τώρα θα παρουσιάσουμε την λύση δεύτερης τάξης. Όσον αφορά τις παραλλαγές του μοντέλου αυτές αφορούν μόνο την λύση πρώτης τάξης και δεν επηρεάζουν καθόλου τις σχέσεις της δεύτερης τάξης.

Εισάγοντας την λύση δεύτερης τάξης το συνολικό έλλειμμα ταχύτητας δίνεται ως

$$DU(x, r) = (DU)_1(x, r) + (DU)_2(x, r) \quad (2.50)$$

Όπου η συμβολή  $DU_2$  δεύτερης τάξης υπολογίζεται ως

$$(DU)_2(x, r) = U_\infty (C_T A(x + x_0)^{-2})^{\frac{2}{3}} \sum_{i=0}^4 d_i z(x, r)^i \quad (2.51)$$

Και το  $z(x, r)$  δίνεται από

$$z(x, r) = r^{\frac{3}{2}} (C_T A(x + x_0))^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{35}{2\pi} \right)^{-\frac{3}{10}} (3 c_1^2)^{-\frac{3}{10}} \quad (2.52)$$

Τέλος οι σταθερές  $d_0$  μέχρι  $d_4$  δίνονται

$$d_0 = \frac{4}{81} \xi_0^6 \left( -1 - 3 \left( 4 - 12 \left( 6 + 27 \left( -4 + \frac{48}{40} \right) \frac{1}{19} \right) \frac{1}{4} \right) \frac{1}{5} \right) \frac{1}{8} \quad (2.53)$$

$$d_1 = \frac{4}{81} \xi_0^6 \left( 4 - 12 \left( 6 + 27 \left( -4 + \frac{48}{40} \right) \frac{1}{19} \right) \frac{1}{4} \right) \frac{1}{5} \quad (2.54)$$

$$d_2 = \frac{4}{81} \xi_0^6 \left( 6 + 27 \left( -4 + \frac{48}{40} \right) \frac{1}{19} \right) \frac{1}{4} \quad (2.55)$$

$$d_3 = \frac{4}{81} \xi_0^6 \left( -4 + \frac{48}{40} \right) \frac{1}{19} \quad (2.56)$$

$$d_4 = \frac{4}{81} \xi_0^6 \frac{1}{40} \quad (2.57)$$

και η παράμετρος  $\xi$  ορίζεται

$$\xi_0 = \left( \frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{1}{5}} (3 c_1^2)^{-\frac{2}{15}} \quad (2.58)$$

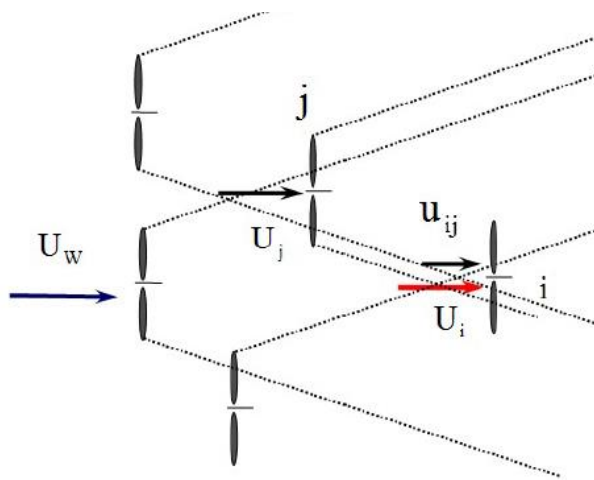


### 3.3 Εφαρμογή των προτύπων

Για την εφαρμογή των υπολογισμών των ελλειμμάτων ταχύτητας σε εφαρμογές αιολικού πάρκου όπου έχουμε επικαλύψεις ομόρρου χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση

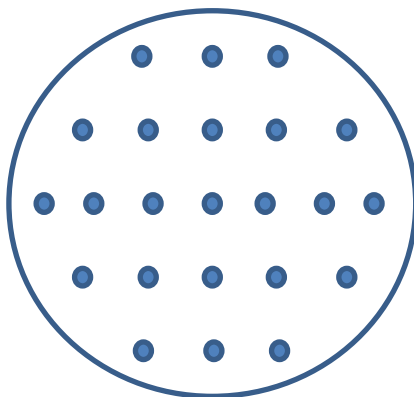
$$(U_w - U_i)^2 = \sum_{j=1}^N [(\bar{U}_j - u_{ij})^2] \quad (2.59)$$

Όπου  $U_i$  είναι η ομοιόμορφη διανομή ταχύτητας πρόσπτωσης στην  $i$  μηχανή,  $u_{ij}$  είναι η ταχύτητα που επάγεται από τον ομόρρου της  $j$ , και  $U_w$  η αδιατάραχτη τιμή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση  $x$  χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η ύπαρξη των μηχανών.



Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση συνδυασμού ομόρρων

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε και ένα μοντέλο τριών διαστάσεων στο υφιστάμενο πρόγραμμα Fortran. Αυτό το μοντέλο λειτουργεί χωρίζοντας τον δίσκο του δρομέα της κάθε ανεμογεννήτριας σε 5 επίπεδα και διανέμοντας στο κάθε επίπεδο ισαπέχοντα σημεία όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι η τελική ταχύτητα αναφοράς του δρομέα θα είναι ο πραγματικός μέσος όρος και ότι δεν θα επηρεάζει το ένα τμήμα της ανεμογεννήτριας περισσότερο από το άλλο. Επίσης στον κώδικα υπάρχει επιλογή παραμετροποίησης του αριθμού των σημείων του πλέγματος για κάθε επίπεδο.



Εικόνα 3.2 Αναπαράσταση τρισδιάστατου πλέγματος δρομέα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

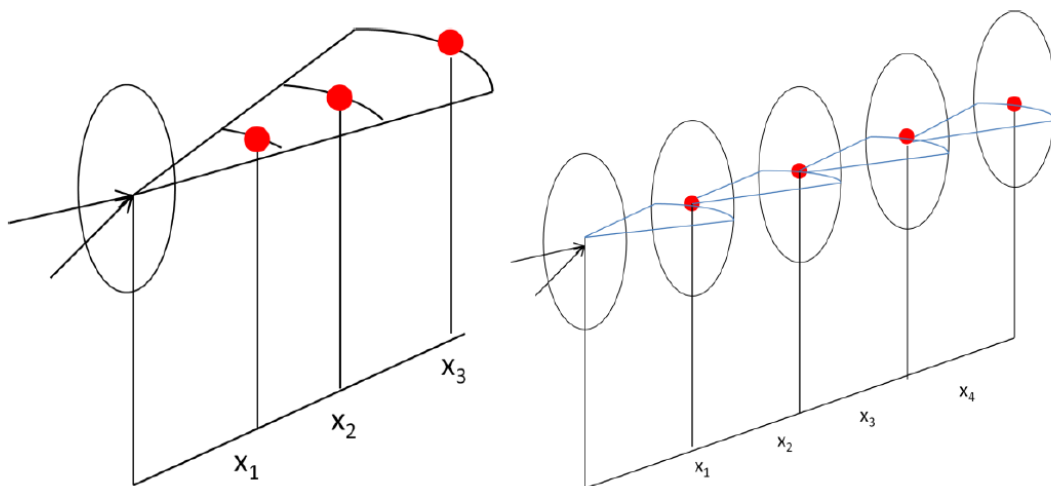
### 4 Αξιολόγηση Μοντέλων

Για την αξιολόγηση των δυο μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από 4 διαφορετικά sites. Συγκεκριμένα είναι τα Nibe (Δανία), Sexbierum (Ολλανδία), EWTW (Ολλανδία) και Navarra (Ισπανία).

#### 4.1 Πείραμα Nibe

Το συγκεκριμένο πείραμα έλαβε χώρα στη Δανία και η εγκατάσταση περιλαμβάνει δύο ανεμογεννήτριες Nibe διαμέτρου 40 μέτρων τοποθετημένες σε επίπεδο έδαφος. Οι δυο ανεμογεννήτριες είναι της τάξης των 630 kW και τοποθετήθηκαν σε απόσταση 5 διαμέτρων ρότορα. Οι μετρήσεις που αποκτήθηκαν από το πείραμα μας δίνουν ελλείμματα ταχύτητας και επίπεδα τύρβης εντός του ομόρρου για μια ποικιλία από συνθήκες λειτουργίας και για αποστάσεις έως και 7.5 διαμέτρους κατάντι μιας ανεμογεννήτριας. Το πείραμα έχει συλλέξει μετρήσεις επίσης για το έλλειμμα ταχύτητας και τα επίπεδα τύρβης εντός ενός διπλού ομόρρου σε αποστάσεις έως και 2.5 διαμέτρων κατάντι της 2<sup>ης</sup> ανεμογεννήτριας, τα φασματικά χαρακτηριστικά του επιπέδου τύρβης στον ομόρρου, την απώλεια ισχύος που υφίσταται ο δρομέας όταν λειτουργεί μέσα σε έναν ομόρρου, τα δυναμικά φορτία που υποβάλλονται στον δρομέα όταν λειτουργεί σε περιοχή ομόρρου, και τις καταπονήσεις και τα εξωτερικά φορτία που απορρέουν από την λειτουργία μιας γεννήτριας σε περιοχή ομόρρου.

Στην αξιολόγηση των μοντέλων Larsen για το πείραμα NIBE χρησιμοποιήθηκε μόνο η περίπτωση του μονού ομόρρου σε αποστάσεις 2.5, 4, 6, και 7.5 διαμέτρων από τον δρομέα. Για την αποτύπωση και μέτρηση του πεδίου ομόρρου της ανεμογεννήτριας αντί για την τοποθέτηση πολλαπλών μετρητικών αισθητήρων για κάθε απόσταση χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας αισθητήρας και λήφθηκαν μετρήσεις για ένα τόξο γωνίας 60 μοιρών γύρω από την μετρούμενη κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο η σχετική θέση του αισθητηρίου σε σχέση με το δρομέα της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου σαρώνοντας το προαναφερθέν τόξο μας οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα με το να είχαμε πολλαπλά αισθητήρια κατά πλάτος του ομόρρου, μειώνοντας το κόστος και απλοποιώντας την διάταξη. Μια αναπαράσταση της διάταξης φαίνεται στην εικόνα (Ζούζιας, 2012).



**Εικόνα 4.1 Αναπαράσταση μετρητικής διάταξης πειράματος NIBE (Ζούζιας, 2012)**

Το μειονέκτημα αυτής της μετρητικής διάταξης είναι ότι λόγω της γύρω τοπογραφίας τα αποτελέσματα θα επηρεάζονται με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου αλλά στο συγκεκριμένο πείραμα αναφέρθηκε πιο πριν ότι επιλέχθηκε όσο γινόταν επίπεδη τοπογραφία ώστε να εξαιρεθεί σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό η επιρροή της στα αποτελέσματα. Ακόμα μια παράμετρος σφάλματος είναι το επίπεδο τύρβης καθώς αυτό αλλάζει με την αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου. Εν μέρη αυτά τα σφάλματα αντικατοπτρίζονται στις μετρήσεις όταν εμφανίζονται ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ταχύτητα ανέμου περιβάλλοντος.

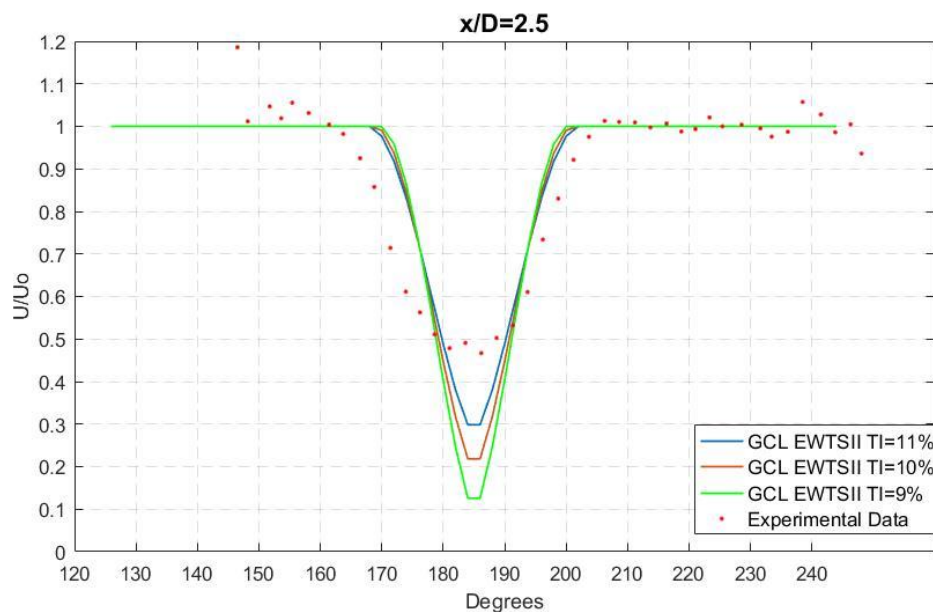
Όπως προ ειπώθηκε οι μετρήσεις έγιναν πάνω σε ένα τόξο που ορίζεται από την απόσταση του από τον δρομέα και την κατεύθυνση του ανέμου. Έτσι τα αποτελέσματα της ταχύτητας ομόρρου θα έχουν αντίστοιχη μορφή και για κάθε κατεύθυνση ανέμου θα υπάρχει μια μέτρηση ταχύτητας ομόρρου.

Οι προλέξεις των μοντέλων προέκυψαν ως έξοδοι ενός προϋπάρχοντος κώδικα Fortran που μοντελοποιήθηκε για τον υπολογισμό των μοντέλων Larsen EWTSII και 2009. Επίσης εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές επιπέδων τύρβης για την αξιολόγηση της ευαισθησίας των μοντέλων. Ως εισόδους τον πρόγραμμα δέχεται το επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος, την ταχύτητα ανέμου περιβάλλοντος, τον συντελεστή ώσης, την ακτίνα του δρομέα, το ύψος του hub από το έδαφος και τις επιθυμητές αποστάσεις από τον δρομέα. Τα δεδομένα που αφορούν το πείραμα NIBE συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

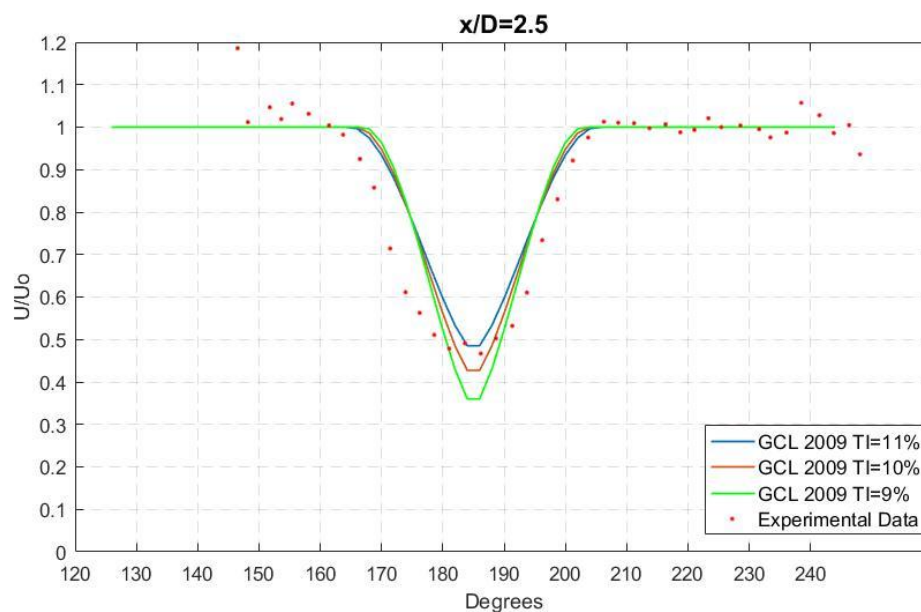
	Ακτίνα Δρομέα (m)	Συντελεστής Ώσης(Ct)	Ταχύτητα Ανέμου ( $U_0$ )	Επίπεδο Τύρβης( $I_a$ )	Ύψος HUB από έδαφος(m)
NIBE	20	0.82	8.55	4-9%	45

**Πίνακας 4.1 Δεδομένα Μετρήσεων NIBE**

Η κεντρική κατεύθυνση ανέμου είναι 188 μοίρες και οι αποστάσεις για τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις είναι 2.5, 4, 6 και 7.5 διαμέτρους δρομέα. Για κάθε απόσταση έγιναν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τα δυο μοντέλα του Larsen με επίπεδα τύρβης 5-9% και 9-11%. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις. Θα αποδειχθεί από τις προλέξεις ότι τα αποτελέσματα για επίπεδα τύρβης περιβάλλοντος που κυμαίνονται στο 9-11% είναι τα πιο αποτελεσματικά όπως επίσης και η μεγάλη ευαισθησία του μοντέλου Larsen στις αλλαγές επιπέδου τύρβης.



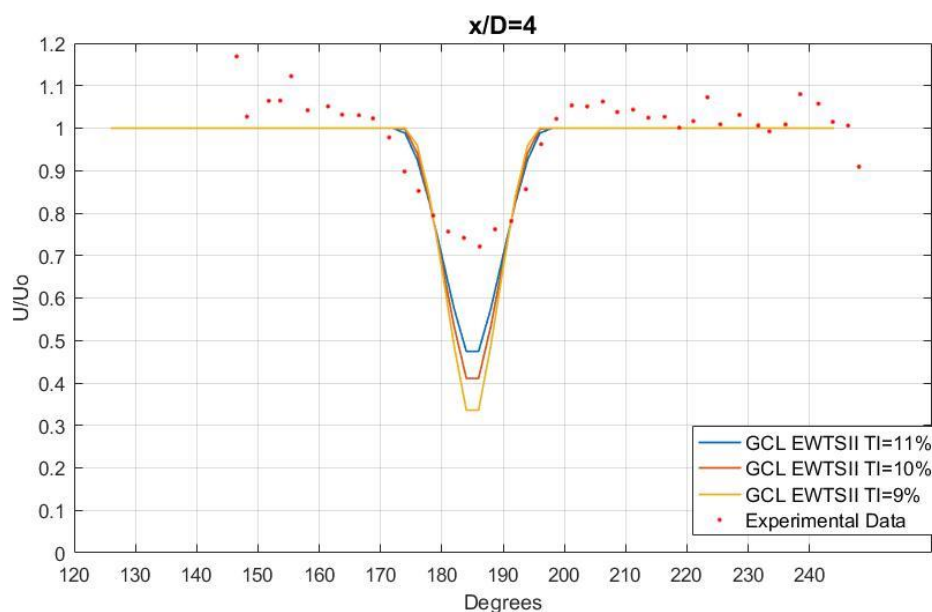
**Γράφημα 4.1** Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 2.5D και τύρβη 9-11%



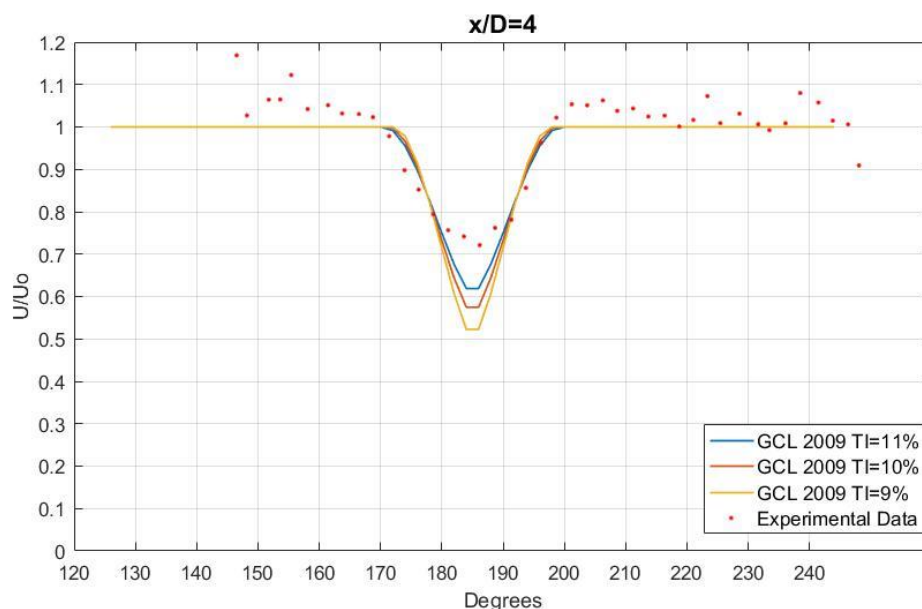
**Γράφημα 4.2** Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 2.5D και τύρβη 9-11%

Στα γραφήματα 4.1, 4.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των 2 μοντέλων για εισόδους επιπέδων τύρβης 9, 10, και 11% σε απόσταση 2.5 διαμέτρων δρομέα. Παρατηρούμε ότι τα δύο μοντέλα έχουν αρκετά παρόμοια κλίση και πλάτος ομόρρου αλλά στο μοντέλο EWTSII έχουμε υπερεκτίμηση του ελλείμματος ταχύτητας στην κεντρική γραμμή του ομόρρου σε όλες τις περιπτώσεις τύρβης. Η πιο κοντινή προσομοίωση του μοντέλου EWTSII είναι για το επίπεδο τύρβης 11% όπου έχουμε υπερεκτίμηση του ελλείμματος ταχύτητας στον κεντρικό άξονα του ομόρρου κατά 16% και στη συνέχεια καθώς το επίπεδο τύρβης μειώνεται, η υπερεκτίμηση ελλείμματος αυξάνεται. Η αύξηση του ελλείμματος ταχύτητας μεταξύ δυο επιπέδων τύρβης στο μοντέλο EWTSII κυμαίνεται περίπου στο 9% της ταχύτητας ελεύθερης ροής. Επομένως για το επίπεδο τύρβης της τάξης του 9%, το έλλειμμα ταχύτητας που προσομοιώνει το μοντέλο EWTSII είναι υπερεκτιμημένο κατά 30% της ταχύτητας ελεύθερης ροής, αποτέλεσμα το οποίο δεν είναι αποδεκτό.

Στην περίπτωση του αναθεωρημένου μοντέλου Larsen 2009 παρατηρούμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα για τα ίδια επίπεδα τύρβης αν και παρατηρείται υποεκτίμηση στο πλάτος του ομόρρου σε σχέση με τις μετρήσεις και στα δυο μοντέλα. Για το μοντέλο 2009 η καλύτερη προσομοίωση των μετρήσεων θα λέγαμε ότι είναι για το επίπεδο τύρβης 11% όπου υπάρχει μια μικρή υποεκτίμηση του ελλείμματος ταχύτητας της τάξης του 2% της ταχύτητας ελεύθερης ροής. Σημαντική παρατήρηση είναι η μεγάλη αλλαγή στην ευαισθησία του αναθεωρημένου μοντέλου του 2009 σε σχέση με το μοντέλο EWTSII όπου η διαφορά των προλέξεων για τα 3 επίπεδα τύρβης κυμαίνονται στο 5% της ταχύτητας ελεύθερης ροής.



Γράφημα 4.3 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 4D και τύρβη 9-11%

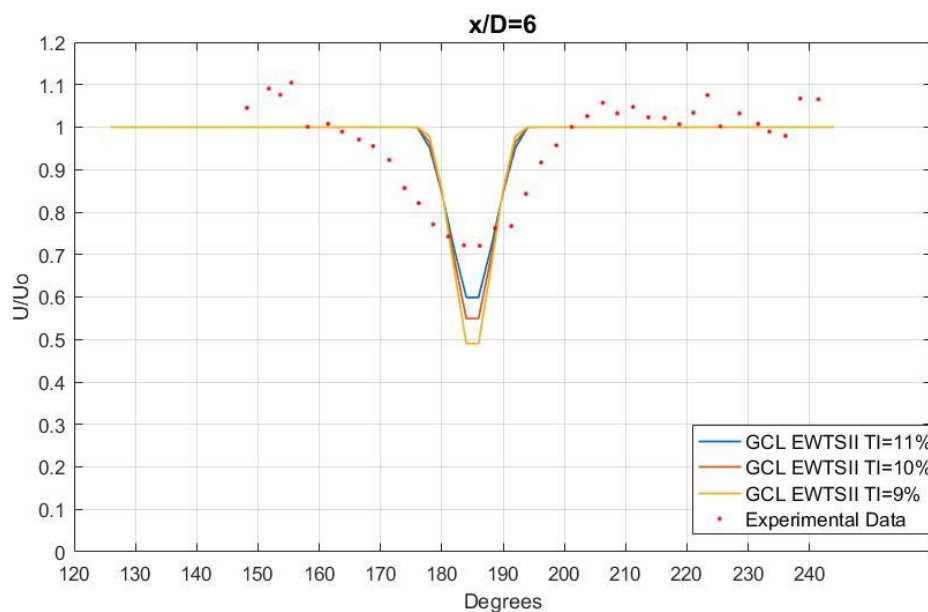


Γράφημα 4.4 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 4D και τύρβη 9-11%

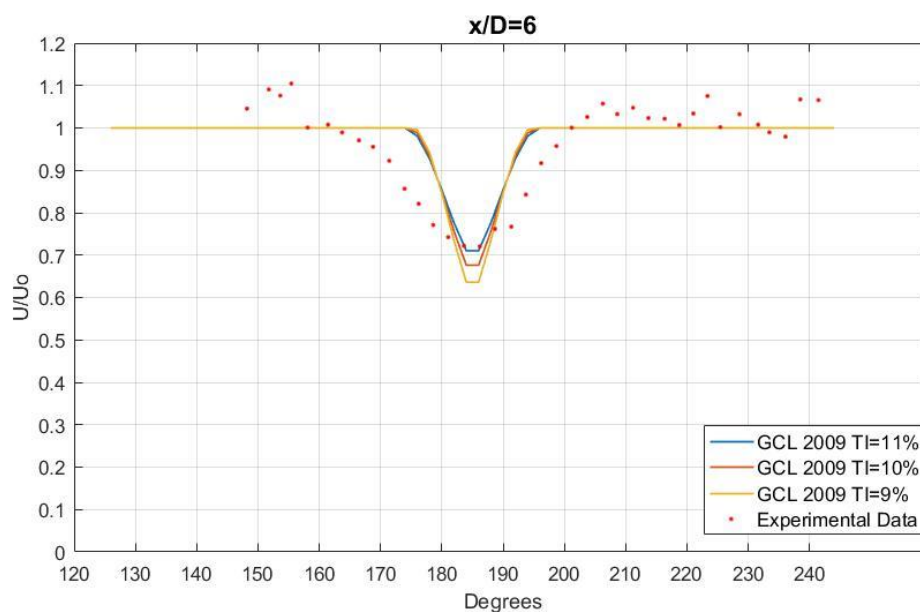
Στα γραφήματα 4.3 και 4.4 αποτυπώνονται οι προλέξεις των 2 μοντέλων για τα ίδια επίπεδα τύρβης σε απόσταση 4 διαμέτρων δρομέα από την ανεμογεννήτρια.

Όσον αφορά το μοντέλο EWTSII έχουμε μεγάλη διαφορά μεταξύ προλέξεων και μετρήσεων για το έλλειμμα ταχύτητας στον άξονα ομόρρου που κυμαίνεται μεταξύ 23% και 37% της ταχύτητας ελεύθερης ροής. Αυτά τα αποτελέσματα είναι υπερβολικά λάθος και δείχνουν τα μειονεκτήματα του μοντέλου ως ημιεμπειρικό. Για το πλάτος και την κλίση του ομόρρου και τα δυο μοντέλα έχουν αρκετά καλά αποτελέσματα.

Στο αναθεωρημένο μοντέλο του 2009 βλέπουμε σαφώς βελτιωμένα αποτελέσματα για το έλλειμμα ταχύτητας σε σχέση με το αρχικό μοντέλο αλλά παραμένουν σχετικά μεγάλες αποκλίσεις στο έλλειμμα ταχύτητας του άξονα ομόρρου που κυμαίνεται από 9 μέχρι 18% με καλύτερα αποτελέσματα για το επίπεδο τύρβης του 11%. Επίσης αυτές οι αποκλίσεις είναι κατά πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις προλέξεις του ίδιου μοντέλου στην απόσταση των 2.5 διαμέτρων.



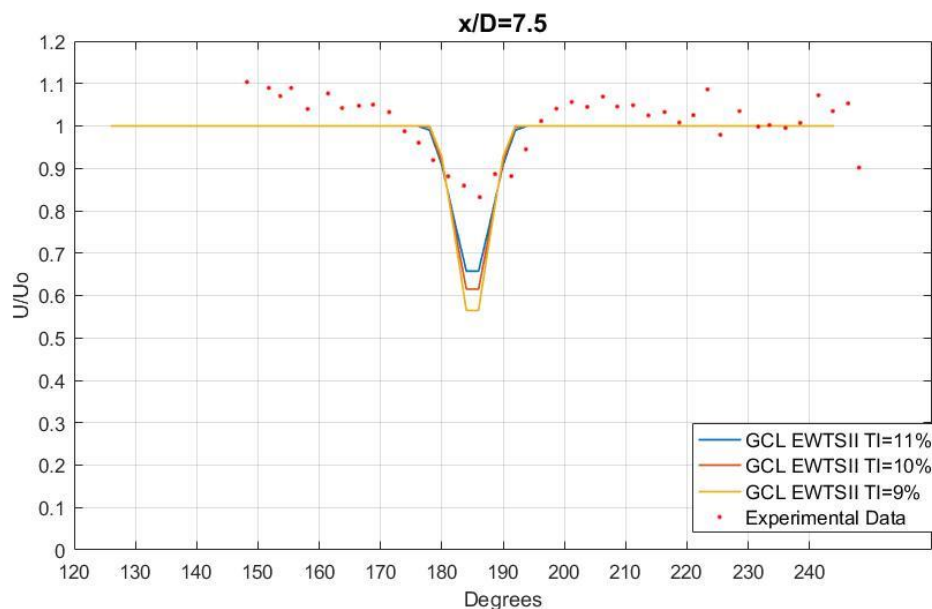
Γράφημα 4.5 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 6D και τύρβη 9-11%



Γράφημα 4.6 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 6D και τύρβη 9-11%

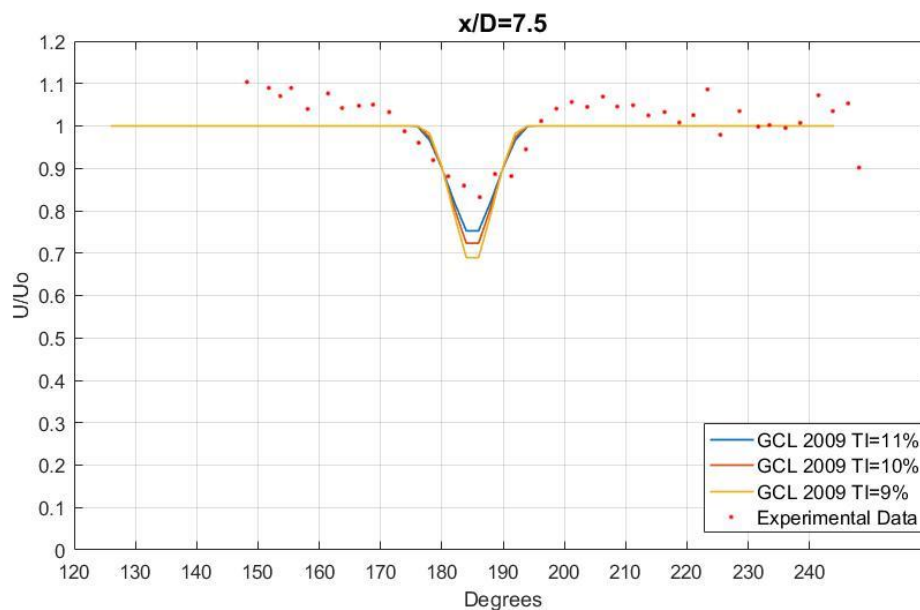
Συνεχίζοντας στα γραφήματα 4.5 και 4.6 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δυο μοντέλων στην απόσταση των 6 διαμέτρων δρομέα κατάντι της ανεμογεννήτριας.

Παρατηρώντας και τα δυο γραφήματα φαίνεται ότι το πλάτος ομόρρου υποεκτιμάται σε μεγάλο βαθμό και η κλίση αντιθέτως υπερεκτιμάται και από τα δυο μοντέλα με την περίπτωση του μοντέλου EWTSII να υφίσταται σε ελαφρώς μεγαλύτερο βαθμό. Όσον αφορά το έλλειμμα ταχύτητας οι προλέξεις και για τα δυο μοντέλα δίνουν αρκετά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την απόσταση των 4<sup>ων</sup> διαμέτρων, με το μοντέλο του EWTSII να υπερεκτιμά το έλλειμμα κατά 11-22% με την καλύτερη προσομοίωση να είναι αυτή με επίπεδο τύρβης 11%. Ενώ για το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 έχουμε σαφώς βελτιωμένα αποτελέσματα και για τα 3 επίπεδα τύρβης με χαμηλότερη ευαισθησία σε αυτά. Η καλύτερη προσομοίωση για το μοντέλο του 2009 είναι για επίπεδο τύρβης 11% και ουσιαστικά συμπίπτει με τις μετρήσεις ενώ για τα επίπεδα τύρβης 9 και 10% έχουμε ελαφρές υπερεκτιμήσεις του ελλείμματος ταχύτητας της τάξης του 4 και 8% της ελεύθερης ταχύτητας ροής.



**Γράφημα 4.7 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 7.5D και τύρβη 9-11%**



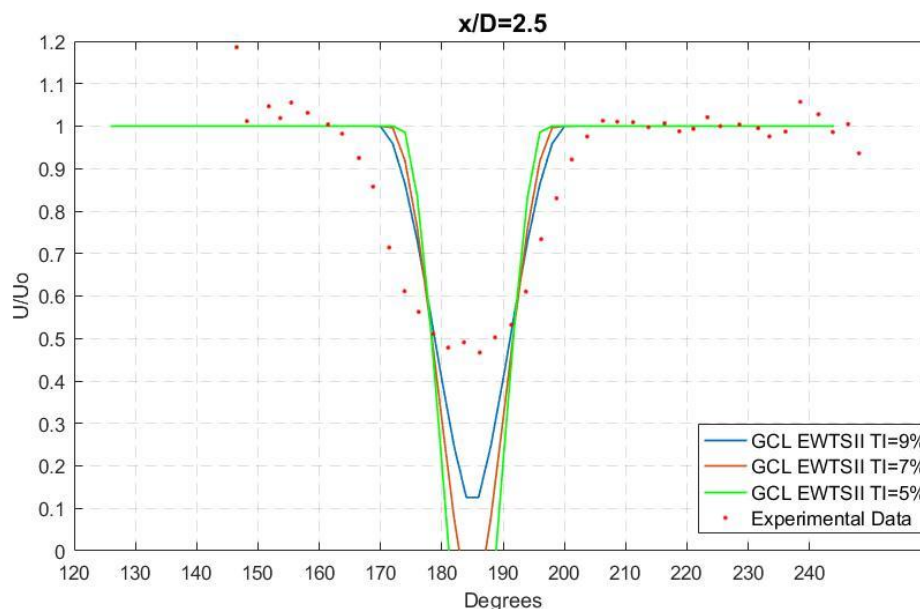


**Γράφημα 4.8 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 7.5D και τύρβη 9-11%**

Στα γραφήματα 4.7 και 4.8 φαίνονται οι προλέξεις των δυο μοντέλων για απόσταση από τον δρομέα 7.5 διαμέτρους.

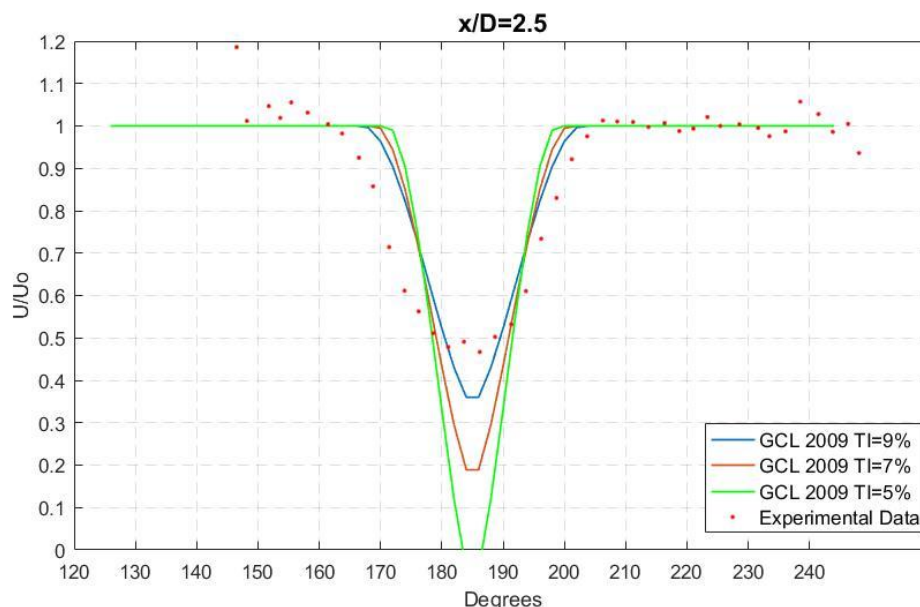
Για το μοντέλο EWTSII συνεχίζουμε να παρατηρούμε μεγάλες αποκλίσεις στο έλλειμμα ταχύτητας του άξονα του ομόρρου που κυμαίνονται μεταξύ 17% και 27%, και ταυτόχρονα το πλάτος του ομόρρου υποεκτιμάται ενώ η κλίση του υπερεκτιμάται.

Στο αναθεωρημένο μοντέλο του 2009 είναι όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις αρκετά καλύτερα όσον αφορά το έλλειμμα ταχύτητας αλλά και το πλάτος και την κλίση του ομόρρου. Το έλλειμμα ταχύτητας κυμαίνεται από 6% για επίπεδο τύρβης στο 11%, μέχρι 14% για επίπεδο τύρβης στο 9%.



**Γράφημα 4.9 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 2.5D και τύρβη 5-9%**





Γράφημα 4.10 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 2.5D και τύρβη 5-9%

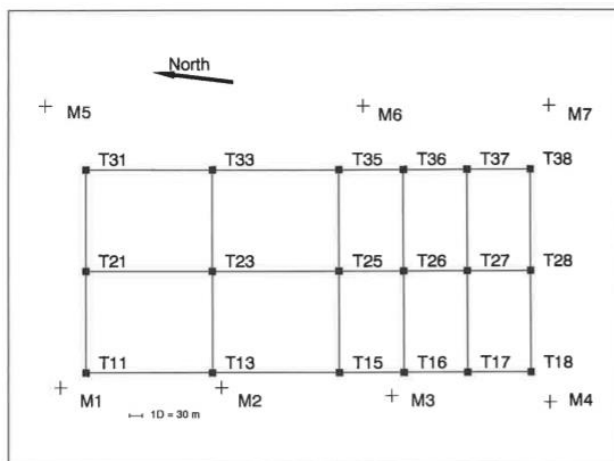
Στα γραφήματα 4.9 και 4.10 απλά παρουσιάζονται οι προλέξεις των δυο μοντέλων για επίπεδα τύρβης κάτω του 9% στην απόσταση των 2.5 διαμέτρων από το δρομέα. Φαίνεται η μεγάλη ευαισθησία του μοντέλου του Larsen σε αλλαγές του επιπέδου της τύρβης και το γεγονός ότι τα μοντέλα προβλέπουν ταχύτητες ομόρρου που είναι αρνητικές υποδεικνύει ότι σε αποστάσεις κοντά την ανεμογεννήτρια, όπου πλησιάζουμε τα όρια του κοντινού ομόρρου, όπως όλα τα κινηματικά μοντέλα αποτυγχάνουν τελείως. Αυτός είναι και ο λόγος που για τις προσομοιώσεις κινηθήκαμε στην περιοχή του 9-11% για τα επίπεδα τύρβης και αυτή η τάση θα συνεχιστεί και στα επόμενα πειράματα όπως θα φανεί παρακάτω.

Ως γενικό συμπέρασμα για το πείραμα NIBE την καλύτερη πρόβλεψη για τα πειραματικά δεδομένα την πετυχαίνει σαφώς το αναθεωρημένο μοντέλο Larsen του 2009 εξ ολοκλήρου και συγκεκριμένα για επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος 11%.

## 4.2 Πείραμα Sexbierum

Το πείραμα αυτό λαμβάνει χώρα στην περιοχή Sexbierum της Ολλανδίας το 1992 με σκοπό τη λήψη μετρήσεων για τη ταχύτητα ανέμου, το επίπεδο τύρβης και τις τάσεις shear εντός μονού ομόρρου ανεμογεννήτριας σε αποστάσεις 2.5, 5.5, και 8 διαμέτρων κατάντι της ανεμογεννήτριας. Το πειραματικό αιολικό πάρκο στο Sexbierum βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Ολλανδίας σε απόσταση περίπου τεσσάρων χιλιομέτρων από την ακτή. Το πάρκο είναι τοποθετημένο σε επίπεδο και ομογενές έδαφος, κυρίως εκτάσεις γρασιδιού. Στα εκτάσεις γύρω από το πάρκο υπάρχουν μόνο γεωργικές καλλιέργειες.

Το αιολικό πάρκο έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5.4 MW και αποτελείται από 18 ανεμογεννήτριες των 300kW η κάθε μια. Οι Α/Γ είναι τοποθετημένες σε ένα ημιτετραγωνισμένο πεδίο που αποτελείται από 3 γραμμές x 6 στήλες όπως φαίνεται στο σχήμα (Cleijne, 1993). Οι ανεμογεννήτριες έχουν ονομαστική ισχύ 310kW, διάμετρο δρομέα 30.1 μέτρα και ύψος hub 35 μέτρα.



Εικόνα 4.1 Χωροθέτηση Πάρκου Sexbierum (Cleijne, 1993)

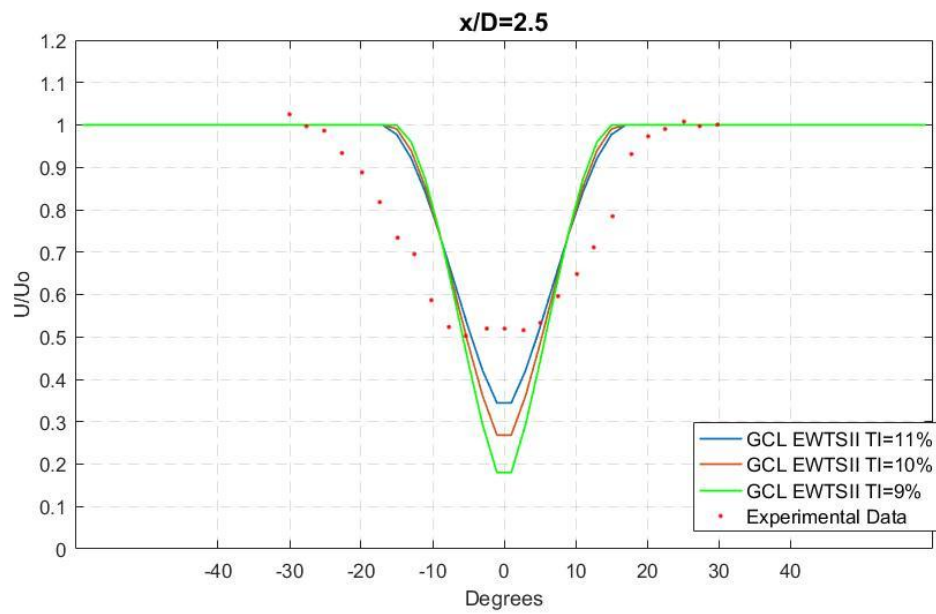
Όπως και στο πείραμα NIBE οι μετρήσεις και οι προσομοιώσεις για τις μετρήσεις Sexbierum θα χρησιμοποιήσουν το σύστημα μέτρησης με μετρήσεις πάνω σε διαγραφόμενο τόξο σε σταθερή απόσταση από τον δρομέα και κέντρο την μία δεδομένη κατεύθυνση ανέμου. Τα δεδομένα των μετρήσεων Sexbierum συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.2.

	Ακτίνα Δρομέα (m)	Συντελεστής Ώσης(Ct)	Ταχύτητα Ανέμου ( $U_0$ )	Επίπεδο Τύρβης( $I_a$ )	Ύψος HUB από έδαφος(m)
SEXBIERUM	15	0.75	8.5	10%	35

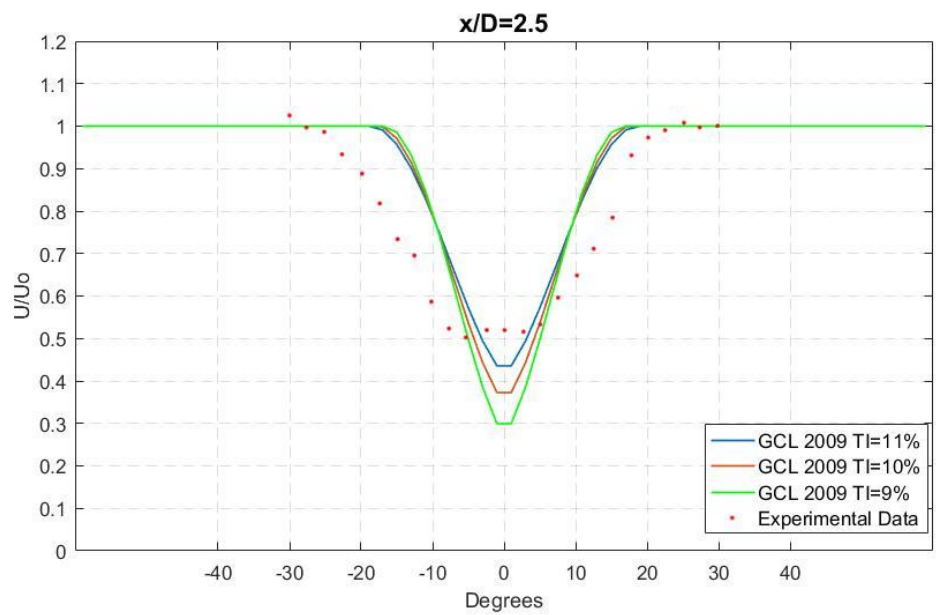
Πίνακας 4.2 Δεδομένα Μετρήσεων SEXBIERUM

Η κεντρική κατεύθυνση ανέμου είναι 0 μοίρες και έχουν γίνει προσομοιώσεις για τα 2 μοντέλα Larsen EWTSII και 2009 και για επίπεδα τύρβης περιβάλλοντος 5-9% και 9-11%.

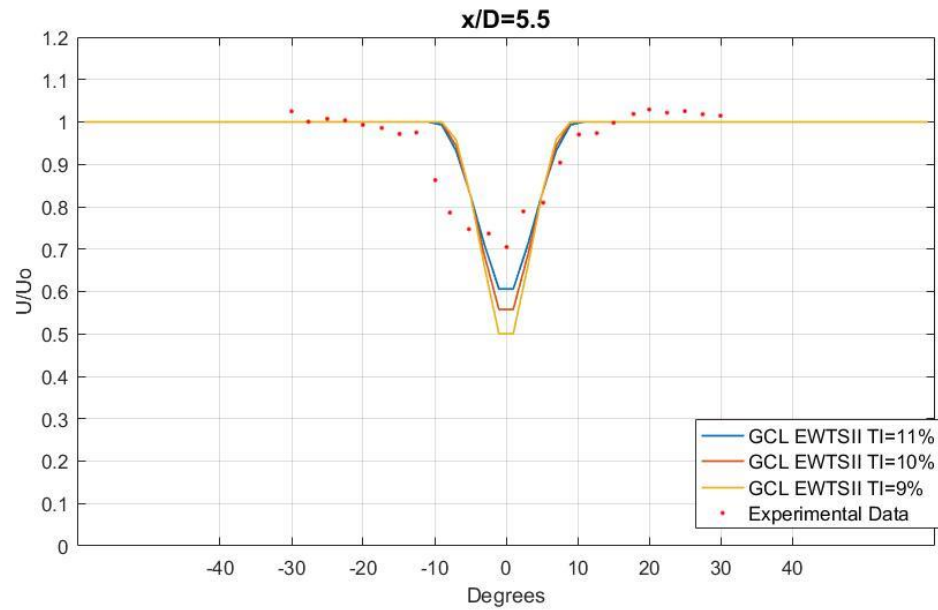
Το πείραμα Sexbierum είναι πολύ παρόμοιο με το πείραμα NIBE και ως επακόλουθο τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα του πειράματος NIBE. Δηλαδή παρατηρείται μεγάλη ευαισθησία στα επίπεδα τύρβης και υπερβολικά μεγάλες υπερεκτιμήσεις του ελλείμματος ταχύτητας του άξονα του ομόρρου από το μοντέλο EWTSII. Ενώ το αναθεωρημένο μοντέλο του 2009 παρουσιάζει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι και τα δυο μοντέλα προβλέπουν αρκετά καλά το έλλειμμα ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις από την ανεμογεννήτρια με το μοντέλο του 2009 να είναι ελαφρά πιο κοντά στις μετρήσεις. Στα γραφήματα 4.11 -4.16 παρουσιάζονται οι προλέξεις των δυο μοντέλων για τις αποστάσεις των 2.5, 5, και 8 διαμέτρων δρομέα από την ανεμογεννήτρια για επίπεδα τύρβης 9-11%. Επίσης στα γραφήματα 4.17 και 4.18 φαίνονται οι παράλογες προβλέψεις των μοντέλων για επίπεδα τύρβης κάτω του 9% όπως ακριβώς είδαμε και στο πείραμα NIBE.



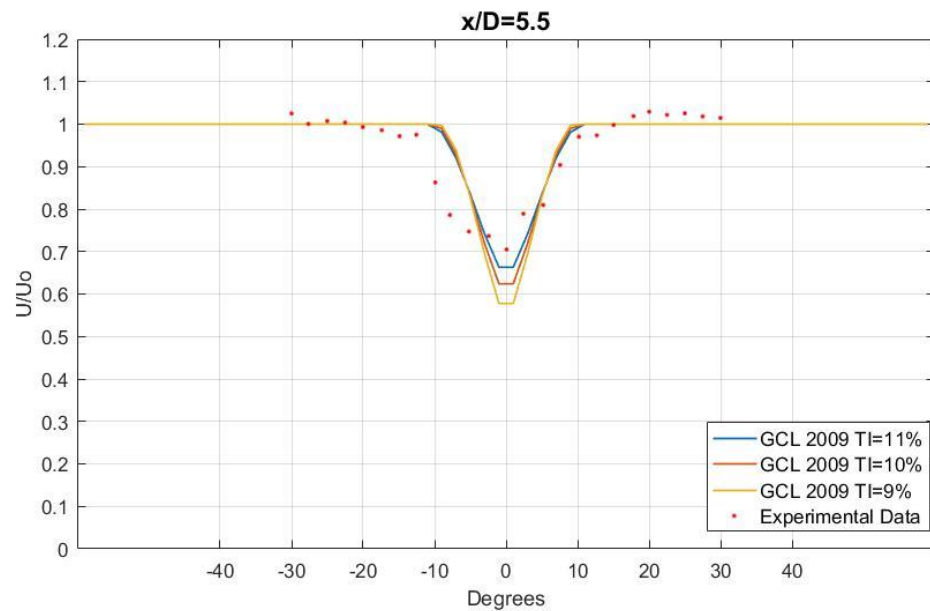
**Γράφημα 4.11 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSH για απόσταση 2.5D και τύρβη 9-11%**



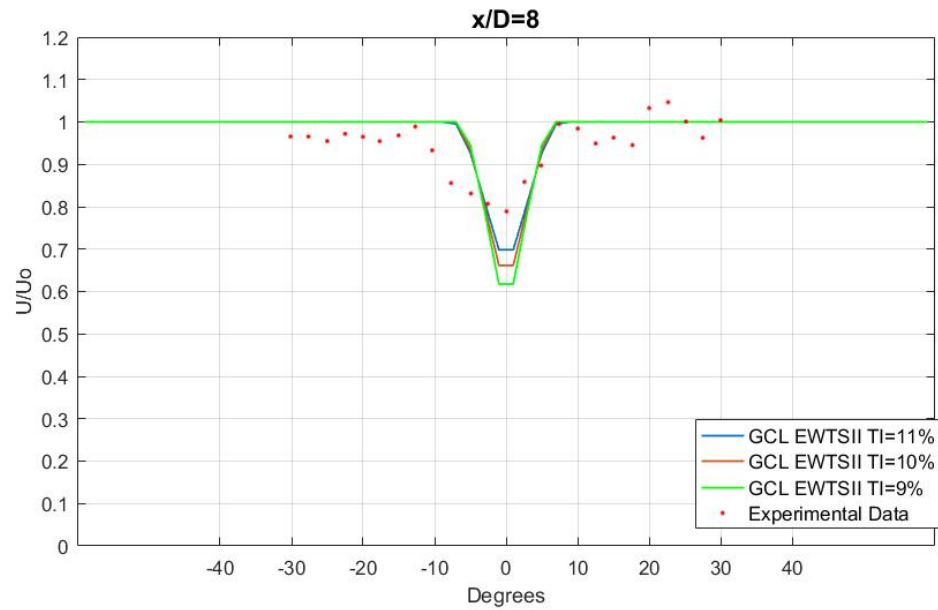
**Γράφημα 4.12 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 2.5D και τύρβη 9-11%**



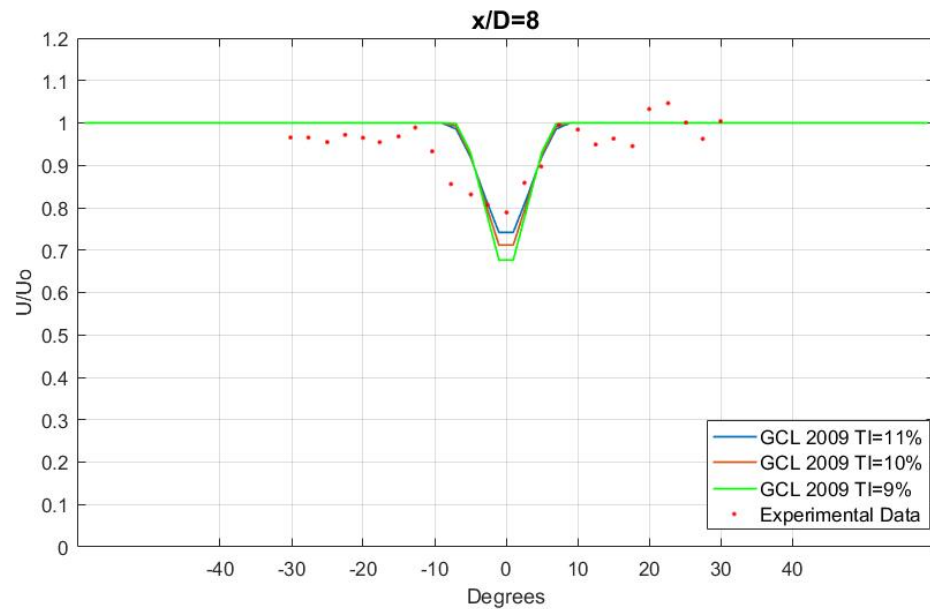
Γράφημα 4.13 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 5.5D και τύρβη 9-11%



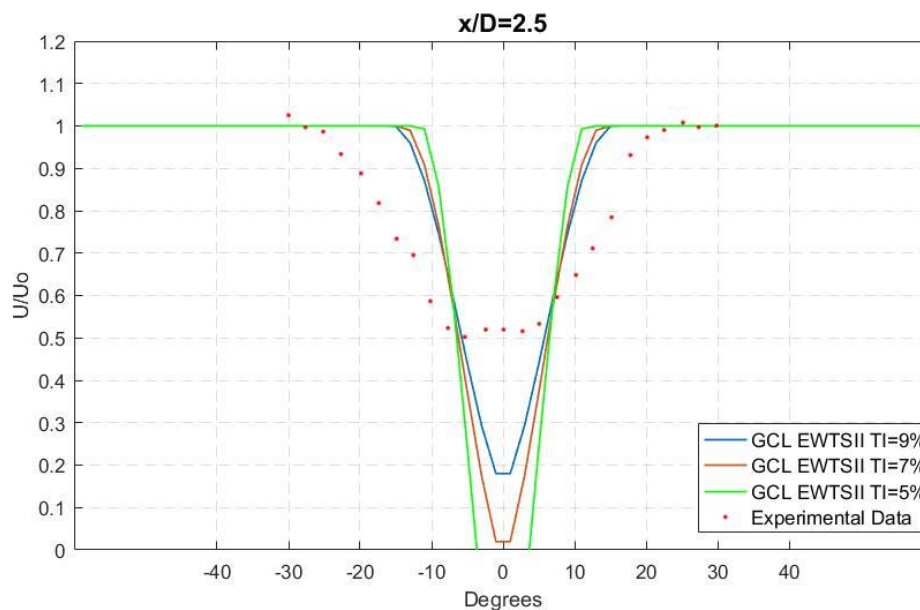
Γράφημα 4.14 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 5.5D και τύρβη 9-11%



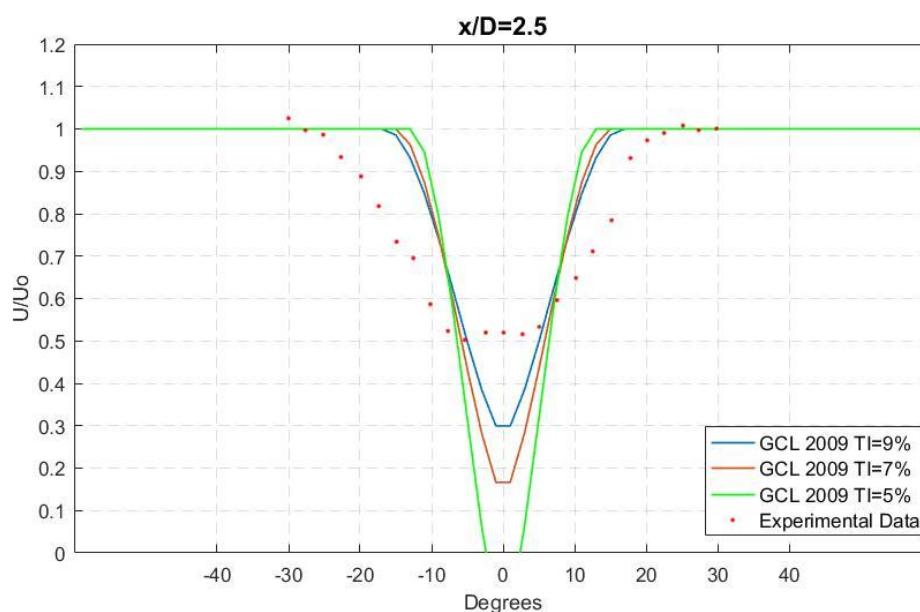
Γράφημα 4.15 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση  $8D$  και τύρβη 9-11%



Γράφημα 4.16 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση  $8D$  και τύρβη 9-11%



Γράφημα 4.17 Προλέξεις μοντέλου GCL EWTSII για απόσταση 2.5D και τύρβη 5-9%



Γράφημα 4.18 Προλέξεις μοντέλου GCL 2009 για απόσταση 2.5D και τύρβη 5-9%

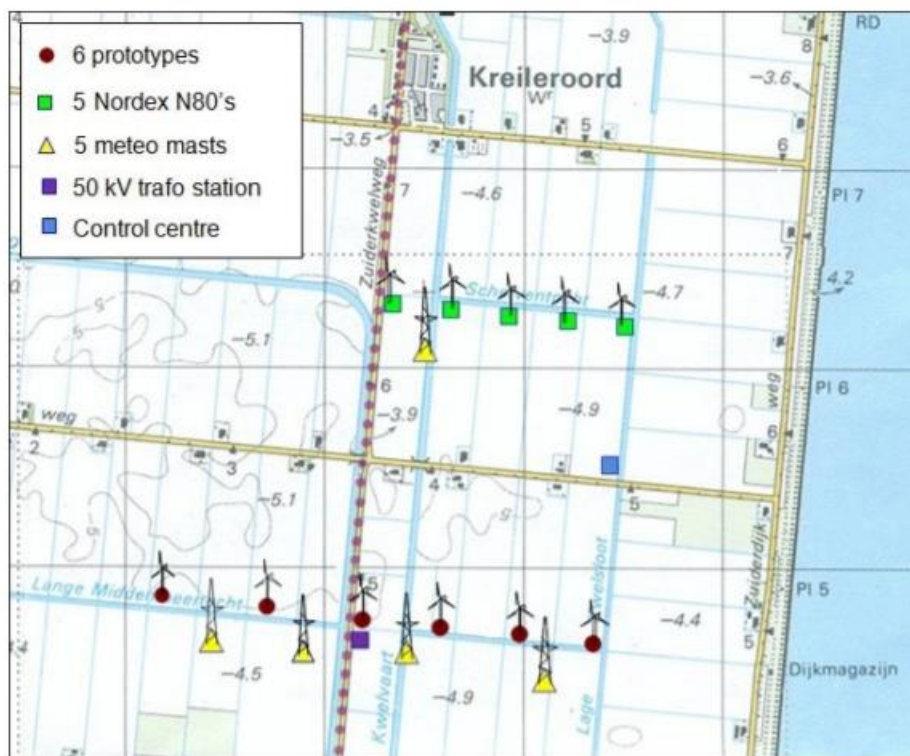
Το γενικό συμπέρασμα για το πείραμα Sexbierum όπως και για το NIBE είναι ότι το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 είναι καλύτερο στις προβλέψεις του και το πιο κοντινό στις μετρήσεις είναι αυτό με επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος 11%.

### 4.3 Πείραμα EWTW (ECN Test Farm)

Το 2003, το τμήμα ECN του οργανισμού έρευνας TNO στην Ολλανδία εγκαίνιασε το αιολικό πειραματικό πάρκο Wieringermeer (ECN Wind Turbine Test Station Wieringermeer). Εγκαταστάθηκαν 5 ανεμογεννήτριες Nordex N80 του ECN των 2.5 MW για να πραγματοποιηθεί έρευνα στην αιολική ενέργεια. Επιπλέον



υπάρχουν στο site άλλες 6 ανεμογεννήτριες (πρωτότυπα) από Siemens, Vestas, General Electric, XEMC-Darwind και Alstom-ecotechnia. Αυτά τα πρωτότυπα χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές για να ελέγξουν τα νέα τους μοντέλα μαζί με το ECN. Το ECN εφαρμόζει εκτεταμένα πειραματικά προγράμματα για τα πρωτότυπα έτσι ώστε να ελέγξει κατά πόσο ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών είναι συμβατός με την πραγματικότητα. Για αυτόν το σκοπό έχουν τοποθετηθεί 5 κολώνες μετρήσεων 108 μέτρων που μπορούν να καταγράψουν ταχύτητα και προσανατολισμό ανέμου σε διάφορες θέσεις και ύψη. Επιπλέον υπάρχουν δυνατότητες χαρτογράφησης της παραγωγής θορύβου και μηχανικών φορτίων στην ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 4.2 Πεδίο πειράματος EWTW

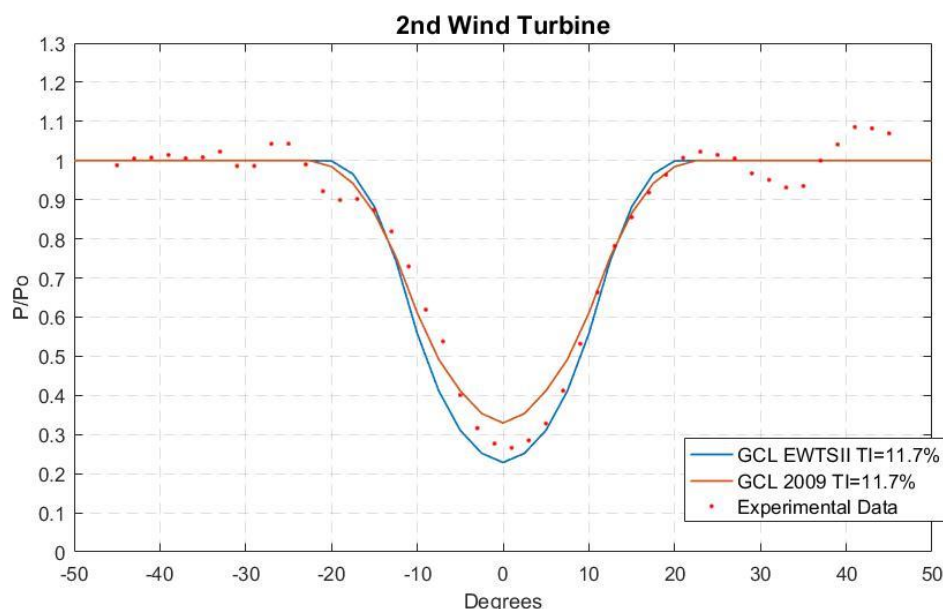
Η διάταξη την οποία θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διπλωματική για την αξιολόγηση των 2 μοντέλων είναι η διάταξη των 5 N80 ανεμογεννητριών σε μια ευθεία οπότε θα προσομοιωθεί και η επικάλυψη ομόρρου. Τα δεδομένα αυτού του πειράματος σε αντίθεση με τα προηγούμενα αφορούν το ποσοστό ισχύος της κάθε ανεμογεννήτριας σε σχέση με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ  $P_i/P_0$  σε άνεμο ελεύθερης ροής. Οι ανεμογεννήτριες είναι αριθμημένες από το 1 έως το 5 με τον αριθμό 1 να είναι η πρώτη ανεμογεννήτρια την οποία συναντάει ο άνεμος με συνέχει την 2<sup>η</sup> κοκ. Όλες οι ανεμογεννήτριες είναι στραμμένες στην κατεύθυνση του ανέμου και οι μετρήσεις δίνονται για ένα εύρος κατευθύνσεων ανέμου 50 μοιρών γύρω από την κατεύθυνση ανέμου στην οποία οι ανεμογεννήτριες είναι ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους. Στην προσομοίωση η γωνία της ευθυγράμμισης αυτής έχει τεθεί στις 0 μοίρες.

Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι στις 3.8 διαμέτρους δρομέα και τα δεδομένα που μας δίνονται με τις μετρήσεις είναι τα παρακάτω

	Ακτίνα Δρομέα (m)	Συντελεστής Ώσης(Ct)	Ταχύτητα Ανέμου ( $U_0$ )(m/s)	Επίπεδο Τύρβης( $I_a$ )	Ύψος HUB από έδαφος(m)
EWTW	40	0.785	7	11.7%	80

Πίνακας 4.3 Δεδομένα Μετρήσεων EWTW

Έχουν πραγματοποιηθεί προσομοιώσεις με τα δυο μοντέλα για επίπεδα τύρβης 10%, 11.7%, και 12.5%. Για τα πειράματα EWTW και Navaarra αλλάζουν λίγο οι προσομοιώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα. Στα προηγούμενα πειράματα υπολογίζαμε το έλλειμμα ταχύτητας για συγκεκριμένα σημεία στο χώρο. Για αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε κώδικας που προσομοιώνει σε τρισδιάστατη μορφή τους δρομείς των ανεμογεννητριών δημιουργώντας ένα πλέγμα από σημεία στην επιφάνειά τους. Στην συνέχεια για κάθε ένα από αυτά τα σημεία υπολογίζεται το έλλειμμα ταχύτητας και η ταχύτητα ροής και στο τέλος ο μέσος όρος όλων των σημείων του πλέγματος μας δίνει την μέση ταχύτητα αναφοράς της ανεμογεννήτριας.

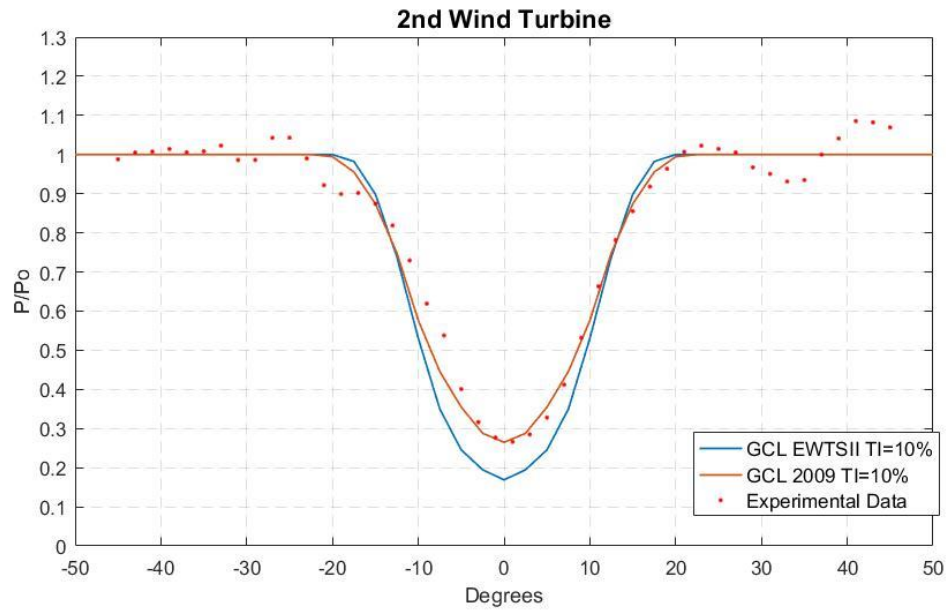
Γράφημα 4.19 Προλέξεις 2<sup>ης</sup> Α/Γ για επίπεδο τύρβης 11.7%

Στο γράφημα 4.19 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δυο μοντέλων για τη 2<sup>η</sup> ανεμογεννήτρια και για επίπεδο τύρβης ίσο με αυτό των μετρήσεων 11.7%. Σε αντίθεση με τα πειράματα NIBE και Sexbierum δεν παρατηρούμε αυτές τις μεγάλες αποκλίσεις από τις μετρήσεις που βλέπαμε σε αυτά τα πειράματα. Τα αποτελέσματα και για τα δυο μοντέλα φαίνεται να προβλέπουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά δεδομένα με το μοντέλο EWTWII να έχει καλύτερη πρόβλεψη για το έλλειμμα ισχύος όταν υπάρχει πλήρη επικάλυψη ομόρρου στην ανεμογεννήτρια και το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 να φαίνεται να προβλέπει καλύτερα τις τιμές του ελλείμματος ισχύος για τις περιπτώσεις κατεύθυνσης ανέμου όπου υπάρχει μερική επικάλυψη ομόρρου για την ανεμογεννήτρια.

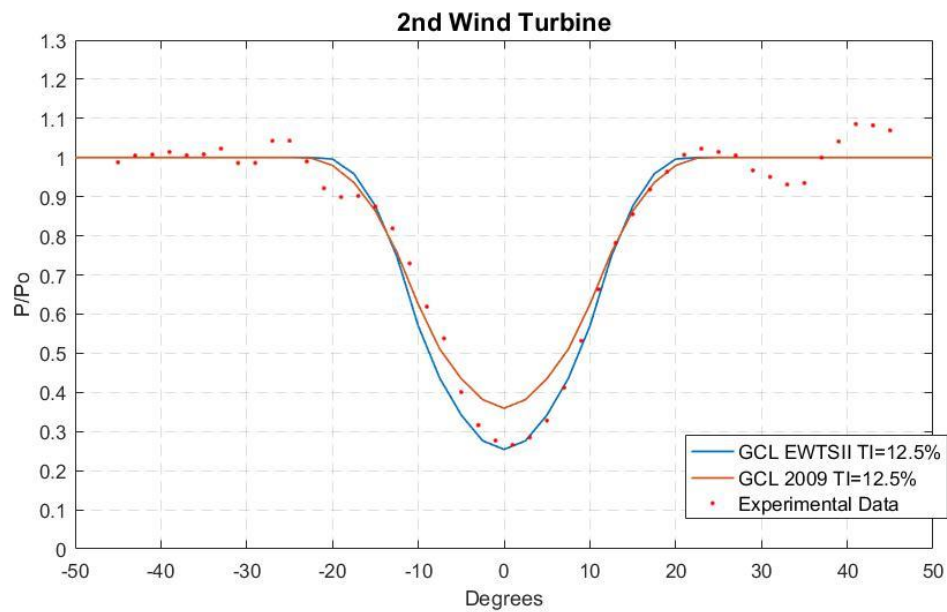
Θέτοντας το επίπεδο τύρβης σε τιμές 10 και 12.5% προσομοιώνονται τα αποτελέσματα που φαίνονται στα γραφήματα 4.20 και 4.21. Εδώ φαίνεται η επίδραση της αλλαγής του επιπέδου τύρβης όπως διαπιστώθηκε και στα πειράματα NIBE και Sexbierum. Όσο αυξάνεται το επίπεδο της τύρβης τόσο μειώνεται το έλλειμμα ισχύος σε σταθερή απόσταση από την ανεμογεννήτρια. Στις περιπτώσεις της προσομοίωσης του μοντέλου 2009 σε επίπεδο τύρβης 10% και της προσομοίωσης EWTWII σε επίπεδο



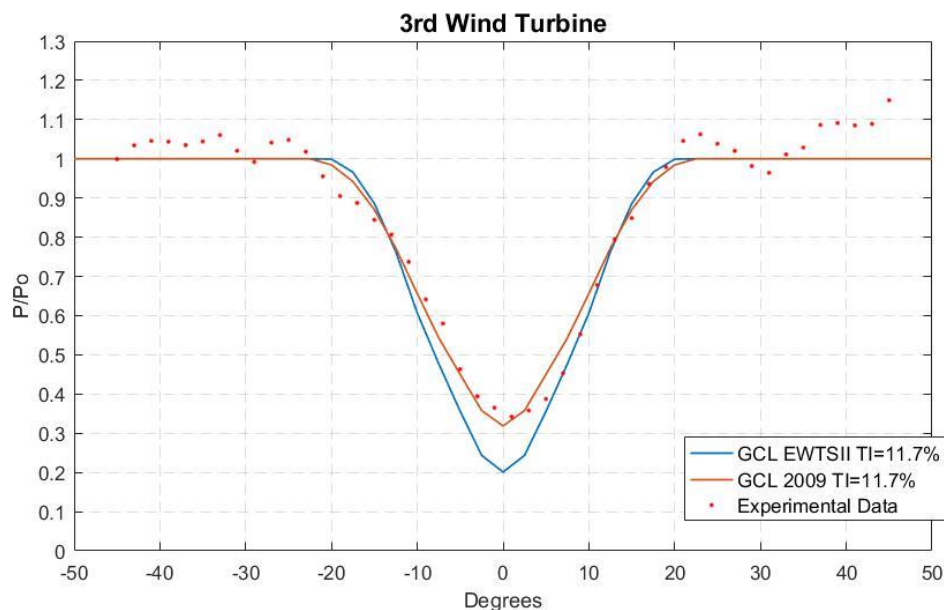
τύρβης 12.5% τα αποτελέσματα σχεδόν συμπίπτουν εξολοκλήρου με τις πειραματικές μετρήσεις.



Γράφημα 4.20 Προλέξεις 2<sup>ης</sup> Α/Γ για επίπεδο τύρβης 10%

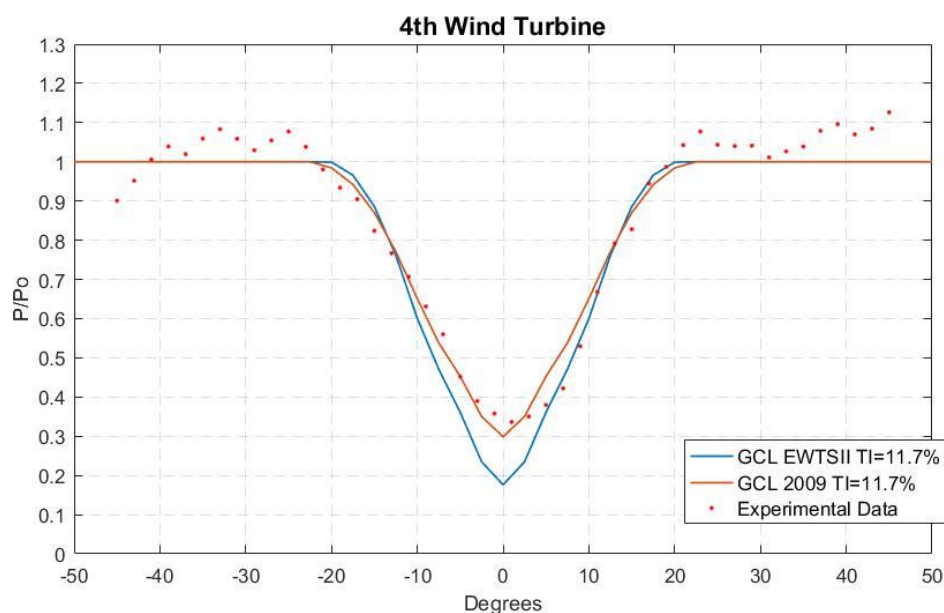


Γράφημα 4.21 Προλέξεις 2<sup>ης</sup> Α/Γ για επίπεδο τύρβης 12.5%



Γράφημα 4.22 Προλέξεις 3<sup>ης</sup> Α/Γ για επίπεδο τύρβης 11.7%

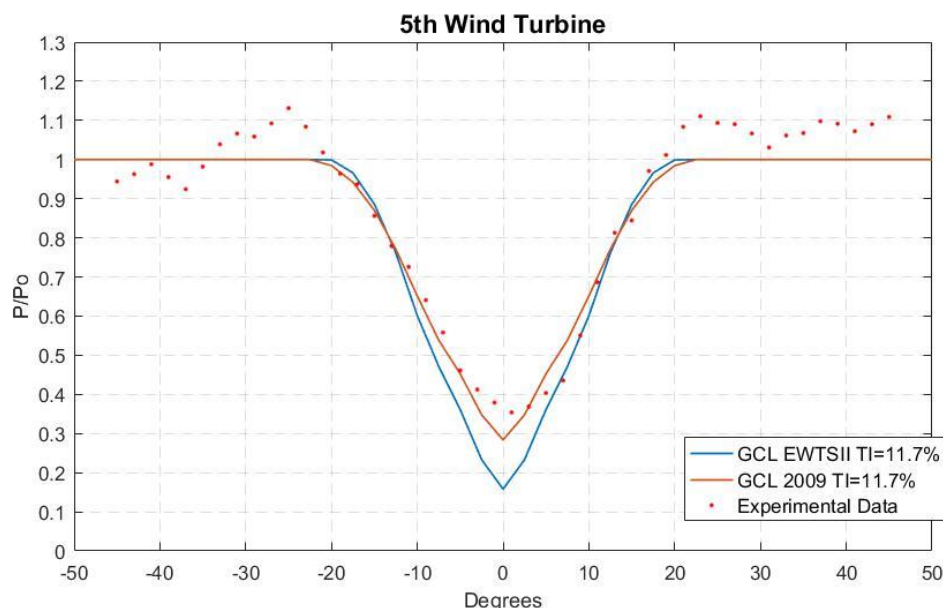
Στο γράφημα 4.22 παρουσιάζονται οι προλέξεις των δυο μοντέλων για την 3<sup>η</sup> ανεμογεννήτρια και για επίπεδο τύρβης ίσο με αυτό των μετρήσεων 11.7%. Εδώ παρατηρούμε μια σημαντική υπερεκτίμηση του ελλείμματος ισχύος περίπου 13% της ισχύος ελεύθερης ροής από το μοντέλο EWTSII στην κατεύθυνση ανέμου 0 μοιρών, δηλαδή στην πλήρη επικάλυψη του ομόρρου της ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση του αναθεωρημένου μοντέλου 2009 τα αποτελέσματα προβλέπουν πολύ καλύτερα την καμπύλη ισχύος της 3<sup>ης</sup> ανεμογεννήτριας συμπίπτοντας με τις πειραματικές μετρήσεις στην πλειονότητα των σημείων.



Γράφημα 4.23 Προλέξεις 4<sup>ης</sup> Α/Γ για επίπεδο τύρβης 11.7%

Στο γράφημα 4.23 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των δυο μοντέλων για την 4<sup>η</sup> ανεμογεννήτρια και για επίπεδο τύρβης ίσο με αυτό των μετρήσεων 11.7%. Η προσομοίωση της 4<sup>ης</sup> ανεμογεννήτριας παρουσιάζει την ίδια εικόνα με την 3<sup>η</sup> στα αποτελέσματά της όπου φαίνεται ότι το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 προβλέπει πολύ καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα και στην περίπτωση της πλήρους επικάλυψης και

στην περίπτωση της μερικής επικάλυψης ομόρρου. Τα μοντέλα αμφότερα προβλέπουν το εύρος του ομόρρου (δηλαδή την κατεύθυνση ανέμου στην οποία κανένα σημείο της ανεμογεννήτριας δεν επηρεάζεται από τους ομόρρους των ανάντι ανεμογεννητριών) με πολύ καλή ακρίβεια.



Γράφημα 4.24 Προλέξεις 5<sup>ης</sup> Α/Γ για επίπεδο τύρβης 11.7%

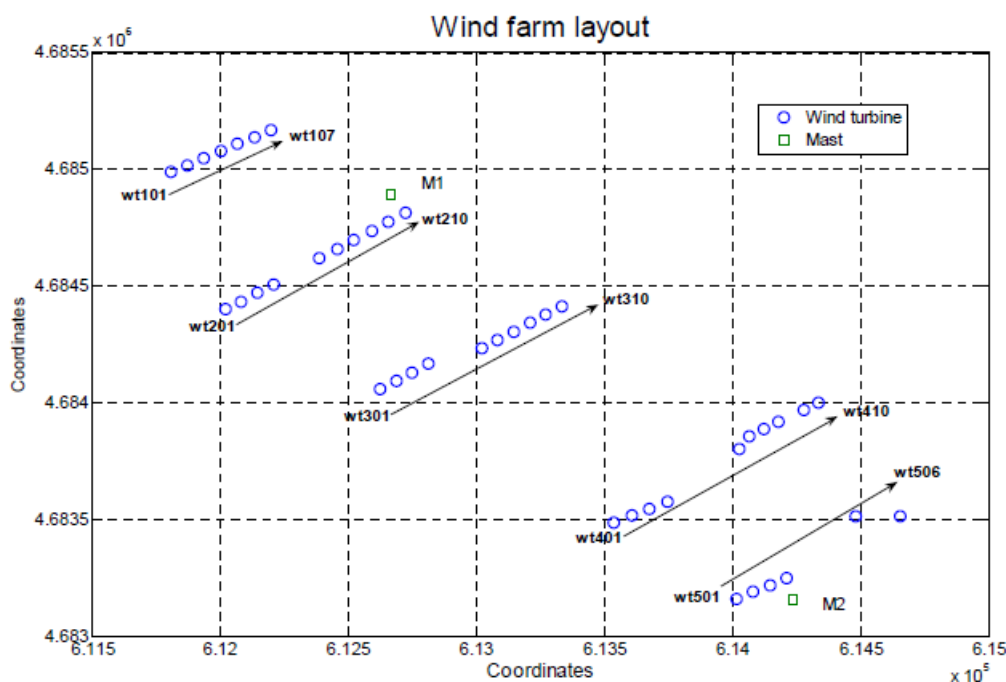
Στο γράφημα 4.24 παρατηρούμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δυο μοντέλων για την 5<sup>η</sup> ανεμογεννήτρια και για επίπεδο τύρβης ίσο με αυτό των μετρήσεων 11.7%. Παρατηρούμε και εδώ ότι το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 προβλέπει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα αν και όχι τόσο καλά όσο στην 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> ανεμογεννήτρια. Το μοντέλο EWTsII έχει σχετικά καλές προβλέψεις για τις περιπτώσεις κατεύθυνσης ανέμου διαφορετικών από την εγκάρσια αλλά υπερεκτιμάει το έλλειμμα ισχύος για την περίπτωση κατεύθυνσης ανέμου που ευθυγραμμίζονται οι 5 ανεμογεννήτριες. Το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 υπερεκτιμάει επίσης το έλλειμμα ισχύος στην κατεύθυνση 0 μοιρών αλλά για πολύ μικρότερο ποσοστό της τάξης του 5% σε σχέση με το 14% του μοντέλου EWTsII. Το μοντέλο του 2009 επίσης συνεχίζει να προβλέπει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα για τις υπόλοιπες κατευθύνσεις ανέμου.

Συμπερασματικά για το πείραμα EWTW αρχικά φαίνεται ότι έχουμε πολύ καλύτερη συμπεριφορά και από τα δυο μοντέλα όσον αφορά τις προβλέψεις τους. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο υψηλό επίπεδο τύρβης που μας δίνει το πείραμα ή στις αποστάσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών που είναι 3.8 διαμέτρους οπότε και αρκετά μακριά από τον κοντινό ομόρρου οπότε τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα.

Συνολικά σε όλες τις εξεταζόμενες ανεμογεννήτριες τις καλύτερες προβλέψεις τις είχε το αναθεωρημένο μοντέλο Larsen του 2009 όπου είχε εξαιρετική ακρίβεια στις προβλέψεις του όσον αφορά το έλλειμμα ισχύος αλλά και το εύρος ομόρρου των ανεμογεννητριών.

#### 4.4 Πείραμα Navarra

Το πείραμα Navarra λαμβάνει θέση σε αιολικό πάρκο στην περιοχή Navarre της Ισπανίας. Το πάρκο περιλαμβάνει 43 ανεμογεννήτριες ECOTECNIA των 750 kW και εγκαταστάθηκαν το 2001. Η τοπογραφία του εδάφους του πάρκου είναι αρκετά επίπεδη αλλά η γύρω περιοχή είναι ανώμαλη. Επίσης οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δυο ύψη hub 45 και 55 μέτρων αντίστοιχα. Η χωροθέτηση του πάρκου περιλαμβάνει ουσιαστικά 5 σειρές ανεμογεννητριών σε ένα πλατό με ύψος 410-420 μέτρα, όπου τα περισσότερα από τα περιβάλλοντα βουνά είναι σε χαμηλότερο ύψος, στην κατεύθυνση 327 μοιρών με την πρώτη σειρά να έχει 7 Α/Γ, τις επόμενες 3 να έχουν 10 Α/Γ, και την τελευταία 6 Α/Γ. Η χωροθέτηση του πάρκου μπορεί να φανεί στην εικόνα 4.3.



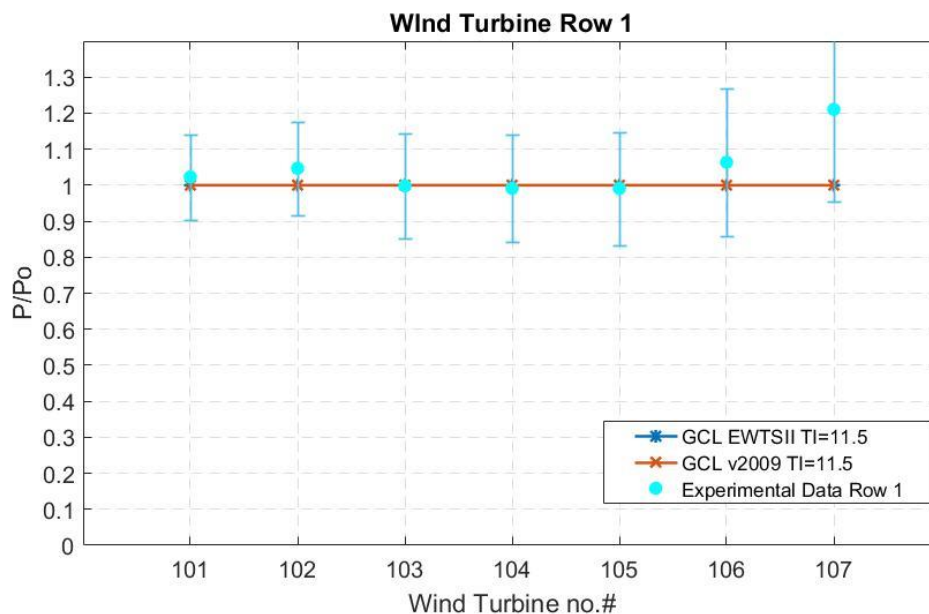
Εικόνα 4.3 Χωροθέτηση πάρκου Navarra (Barthelmie, και συν., 2008)

Τα δεδομένα του συγκεκριμένου πειράματος είναι τα ακόλουθα

	Ακτίνα Δρομέα (m)	Κατεύθυνση Ανέμου (μοίρες)	Ταχύτητα Ανέμου ( $U_0$ )(m/s)	Επίπεδο Τύρβης( $I_a$ )	Ύψος HUB από έδαφος(m)
Navarra	24.2	327	8	11.5%	45/55

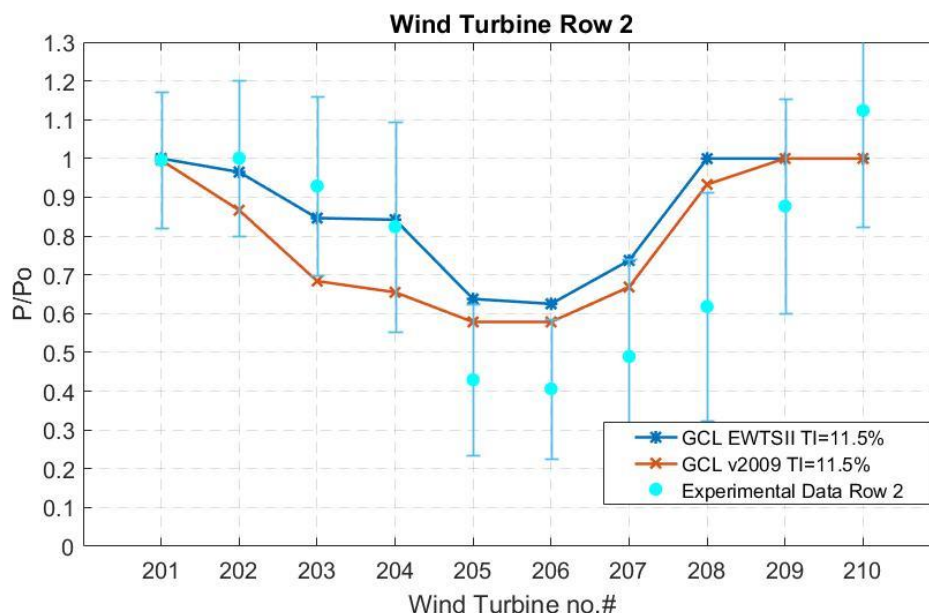
Πίνακας 4.4 1 Δεδομένα Μετρήσεων Navarra

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προσομοίωση παρόλο που λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά ύψη των μηχανών δεν μπορεί να μοντελοποιήσει την ανώμαλη τοπογραφία της περιοχής και έτσι τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενο να μην έχουν την μέγιστη ακρίβεια. Η προσομοίωση έγινε και για τα δύο μοντέλα για επίπεδα τύρβης 9, 11.5 και 13%.



Γράφημα 4.25 Προλέξεις και μετρήσεις σειράς 1<sup>ης</sup> για τύρβη 11.5%

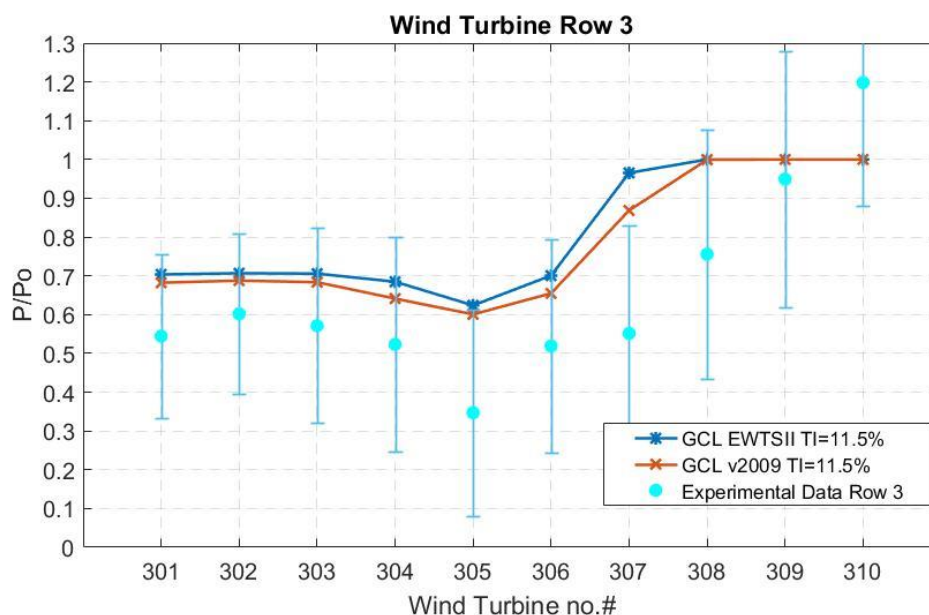
Το γράφημα 4.25 δείχνει το ποσοστό ισχύος των ανεμογεννητριών της 1<sup>ης</sup> σειράς για τα δυο μοντέλα και για ποσοστό τύρβης 11.5%. Τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα καθώς αφού είναι η πρώτη σειρά όλες οι ανεμογεννήτριες δέχονται άνεμο ταχύτητας ελεύθερης ροής και έτσι έχουν ποσοστό ισχύος ίσο με 1. Ο λόγος για τον οποίο οι πειραματικές μετρήσεις για κάποιες από τις ανεμογεννήτριες είναι μεγαλύτερες του 1 είναι λόγω της ιδιομορφίας του εδάφους όπου σε κάποια σημεία η ροή επιταχύνεται πέρα της ταχύτητας ελεύθερης ροής.



Γράφημα 4.26 Προλέξεις και μετρήσεις σειράς 2<sup>ης</sup> για τύρβη 11.5%

Το γράφημα 4.26 παρουσιάζει το ποσοστό ισχύος των ανεμογεννητριών της 2<sup>ης</sup> σειράς για τα 2 μοντέλα και για ποσοστό τύρβης 11.5%. Στο διάγραμμα της 2<sup>ης</sup> σειράς τις ενδιάμεσες ανεμογεννήτριες να δέχονται την μεγαλύτερη επίδραση στο έλλειμμα ισχύος τους και τις ακριανές να επηρεάζονται από λίγο έως καθόλου. Την γενική τοπολογία των μετρήσεων ακολουθούν και τα δυο μοντέλα με το μοντέλο EWTSII να πλησιάζει αρκετά τα πειραματικά δεδομένα για τις ανεμογεννήτριες 201-204 και 209-

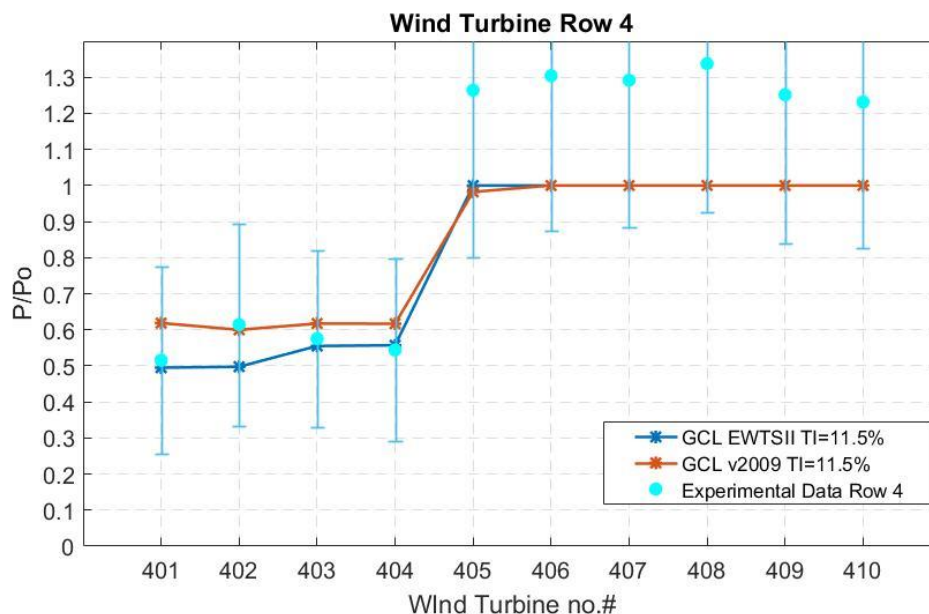
210 αλλά να υποεκτιμάει το έλλειμμα ισχύος για τις ενδιάμεσες μηχανές κατά ένα μεγάλο ποσοστό. Για το αναθεωρημένο μοντέλο 2009 ακολουθεί και αυτό την γενική καμπύλη των πειραματικών δεδομένων αλλά οι μετρήσεις του είναι εκτός των ακριανών ανεμογεννητριών αρκετά μακριά από τα πειραματικά δεδομένα.



Γράφημα 4.27 Προλέξεις και μετρήσεις σειράς 3<sup>ης</sup> για τύρβη 11.5%

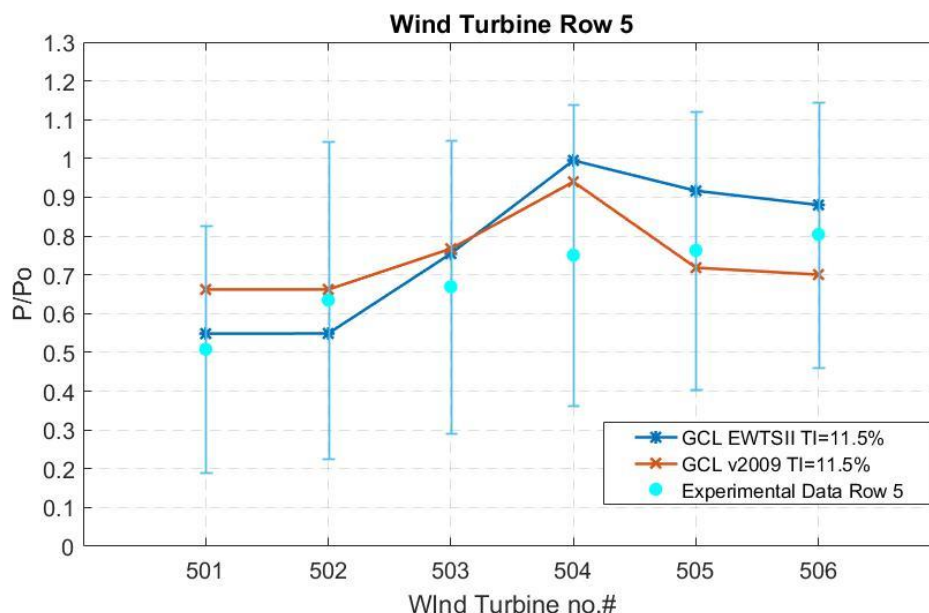
Στο γράφημα 4.27 φαίνεται το ποσοστό ισχύος των ανεμογεννητριών της 3<sup>ης</sup> σειράς για τα 2 μοντέλα και για ποσοστό τύρβης 11.5%. Εδώ όσον αφορά τα πειραματικά δεδομένα φαίνεται ότι επηρεάζονται όλες οι ανεμογεννήτριες από τους ορόρους των ανάντι σειρών εκτός από τις 309 και 310. Οι προσομοιώσεις των μοντέλων οι οποίες είναι πολύ κοντά μεταξύ τους φαίνεται να προσομοιώνουν σωστά την γενική καμπύλη αλλά στις ανεμογεννήτριες 305, 307 και 308 έχουν αποτύχει να προβλέψουν το ποσοστό επίδρασης των ορόρων των ανάντι σειρών με αποτέλεσμα να υποεκτιμούν το έλλειμμα ισχύος κατά ένα μεγάλο ποσοστό.





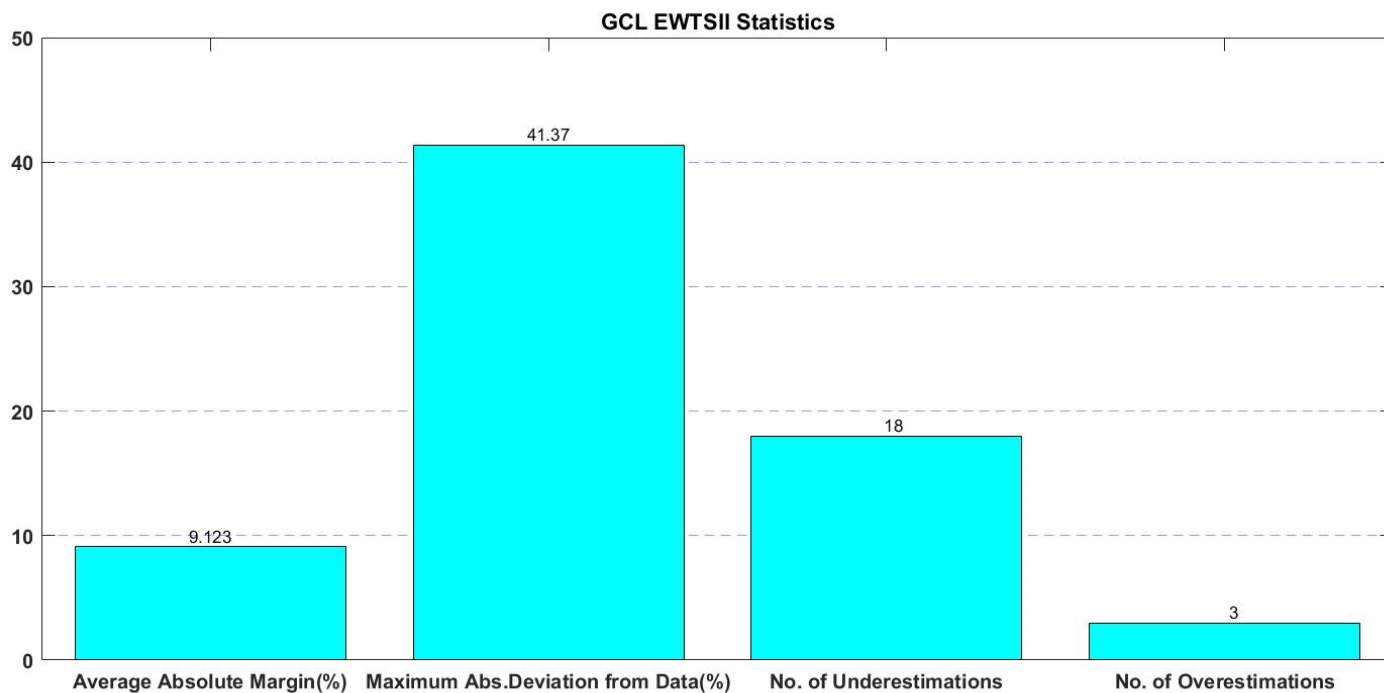
Γράφημα 4.28 Προλέξεις και μετρήσεις σειράς 4<sup>ης</sup> για τύρβη 11.5%

Στο γράφημα 4.28 φαίνεται το ποσοστό ισχύος των ανεμογεννητριών της 4<sup>ης</sup> σειράς για τα 2 μοντέλα και για ποσοστό τύρβης 11.5%. Στην 4<sup>η</sup> σειρά και τα δυο μοντέλα έχουν προβλέψει σε πολύ μεγάλο βαθμό το ποσοστό ισχύος των ανεμογεννητριών και ειδικά αυτών που δεν επηρεάζονται από ομόρρους των ανάντι σειρών δηλαδή τις 405-410. Όπως αναφέραμε ο λόγος που σε αυτές τις ανεμογεννήτριες τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ποσοστό ισχύος μεγαλύτερο της μονάδας είναι διότι η ροή επιταχύνεται λόγω της τοπογραφίας του εδάφους.

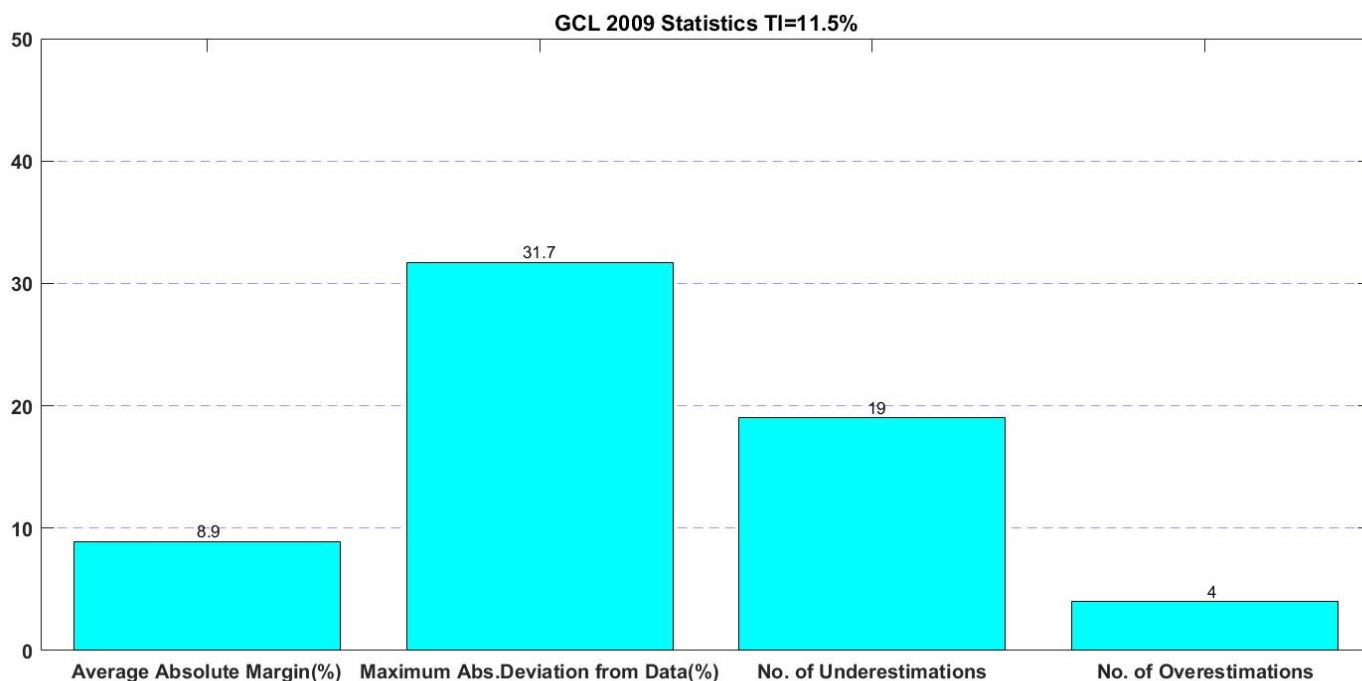


Γράφημα 4.29 Προλέξεις και μετρήσεις σειράς 5<sup>ης</sup> για τύρβη 11.5

Στο γράφημα 4.29 φαίνεται το ποσοστό ισχύος των ανεμογεννητριών της 5<sup>ης</sup> σειράς για τα 2 μοντέλα και για ποσοστό τύρβης 11.5%. Παρατηρούμε ότι στην 5<sup>η</sup> σειρά δεν υπάρχει τόσο καλή πρόβλεψη της καμπύλης από τα δυο μοντέλα αν και σε κάποιες ανεμογεννήτριες πλησιάζουν πολύ τις πειραματικές τιμές.



**Γράφημα 4.30 Στατιστικά στοιχεία μοντέλου EWTSII για τύρβη 11.5%**



**Γράφημα 4.31 Στατιστικά στοιχεία μοντέλου 2009 για τύρβη 11.5%**

Στα γραφήματα 4.30 και 4.31 έχει γίνει μια στατιστική σύνοψη για τα αποτελέσματα των δυο μοντέλων που παρουσιάστηκαν παραπάνω έτσι ώστε να βγει ένα γενικό συμπέρασμα για το κάθε μοντέλο αναφορικά του πειράματος Navarra. Τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκαν αφού πρώτα εξομαλύνθηκαν οι περιπτώσεις των μετρήσεων που ξεπερνούσαν τη μονάδα. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται είναι μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων και του εκάστοτε μοντέλου, η μέγιστη



διαφορά μεταξύ μετρήσεων και μοντέλου, και ο αριθμός των υποεκτιμήσεων και υπερεκτιμήσεων του ποσοστού ισχύος μόνο για περιπτώσεις που αυτό ξεπερνάει το 5%. Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα το αναθεωρημένο μοντέλο Larsen του 2009 προβλέπει κατά μέσο όρο καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με το EWTSII και αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη διαφορά που παρατηρήθηκε για το μοντέλο EWTSII ήταν κατά 10% μεγαλύτερη σε σχέση με το μοντέλο του 2009. Όσον αφορά τις υπερεκτιμήσεις και υποεκτιμήσεις μεγαλύτερες του 5% των μοντέλων το μοντέλο EWTSII υπερτερεί ελάχιστα κατά μια μονάδα και στις δυο κατηγορίες.

Γενικά θα λέγαμε ότι το αναθεωρημένο μοντέλο Larsen του 2009 προβλέπει καλύτερα τις πειραματικές μετρήσεις και σε αυτό το πείραμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5 Συμπεράσματα

Ως γενική εικόνα φαίνεται ότι σε όλα τα πειράματα το αναθεωρημένο μοντέλο Larsen του 2009 υπερισχύει του μοντέλου EWTSH. Το μοντέλο του 2009 φαίνεται να έχει διορθώσει σε ένα βαθμό την υπερευαισθησία του παλαιού μοντέλου EWTSH στο επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος, και προβλέπει με αρκετά καλή ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα ειδικά στο πείραμα EWTW αλλά εν μέρη και στα υπόλοιπα. Προβλέπει σωστά την κλίση του ελλείμματος ταχύτητας εντός του ομόρρου και το πλάτος του ομόρρου.

Ως αρνητικά θα λέγαμε ότι υπάρχουν προβλήματα στις προβλέψεις και των δυο μοντέλων όταν οι αποστάσεις μεταξύ των μηχανών πλησιάζουν στην περιοχή του κοντινού ομόρρου κάτι το οποίο είναι φυσικό για κινηματικά μοντέλα. Επίσης η ευαισθησία στο επίπεδο τύρβης περιβάλλοντος αν και μειωμένη παραμένει ισχυρή στο πρότυπο και επίσης από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν φάνηκε ότι και τα δυο πρότυπα ανταποκρίνονται πολύ άσχημα σε χαμηλά ποσοστά τύρβης (<9%).

Τέλος για το σκοπό που δημιουργήθηκε το ημιεμπειρικό πρότυπο Larsen που είναι μια αποτίμηση της παραγωγής αιολικού πάρκου για διαφορετικές χωροθετήσεις και αριθμούς μηχανών, δεδομένου ότι οι αποστάσεις σε πραγματικές εφαρμογές μεταξύ των μηχανών συνήθως δεν προσεγγίζουν καθόλου την περιοχή του κοντινού ομόρρου, κρίνεται ικανοποιητικό για μια σχετικά καλή πρόβλεψη παραγωγής του πάρκου. Επιπλέον η εξαιρετικά χαμηλή υπολογιστική ισχύς που απαιτεί το μοντέλο σε σχέση με υπολογιστικά μοντέλα πεδίου το κάνει ακόμα πιο χρήσιμο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## 6 Βιβλιογραφία

- Ainslie, J. F. (1988). Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 27(1-3) 213-224.
- Ammara, I., Leclerc, C., & Masson, C. (2002). A viscous three-dimensional differential/actuator-disk method for the aerodynamic analysis of wind farms. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(4), 345-356.
- Barthelmie, R. J., Frandsen, S. T., Rathmann, O., Hansen, K. S., Politis, E. S., Prospathopoulos, J., & Schlez, W. (2008). *Flow and wakes in large wind farms in complex terrain and offshore*.
- Cleijne, J. W. (1993). *Results of sexbierum wind farm: single wake measurements*.
- Frangoul, A. (2018, March 1). *Plans for world's 'largest and most powerful' offshore wind turbine unveiled*. Ανάκτηση από CNBC: <https://www.cnn.com/2018/03/01/plans-for-worlds-largest-and-most-powerful-offshore-wind-turbine-unveiled.html>
- Katic, I., Højstrup, J., & Jensen, N. O. (1987). *A simple model for cluster efficiency*. A. Raguzzi. In European wind energy association conference and exhibition.
- Larsen, G. C. (1988). *A simple wake calculation procedure (pp. 1-53)*. Risø-M-2760: Risø National Laboratory.
- Larsen, G. C. (2009). *A simple stationary semi-analytical wake model*.
- Mikkelsen, R. F., & Sørensen, J. N. (2004). *Actuator disc methods applied to wind turbines*.
- Pierik, J. T., Dekker, J. W., Braam, H., Bulder, B. H., Winkelaar, D., Larsen, G. C., & ... & Molly, J. P. (1999, March). *European wind turbine standards II (EWTS-II)*. In EWEC-CONFERENCE- (pp. 568-571).
- Rathmann, O., Barthelmie, R., & Frandsen, S. (2006, February). *Turbine wake model for wind resource software*. In Proc. European Wind Energy Conf.
- Renkema, D. J. (2007). *Validation of wind turbine wake models*. Master of Science Thesis. Delft University of Technology, 19.
- Schepers, G., Barthelmie, R., Rados, K., Lange, B., & Schlez. (2001). Large off-shore windfarms: linking wake models with atmospheric boundary layer models. *Wind Engineering*, 25(5) 307-316.

*Ten of the Biggest Turbines*. (2018, September 3). Ανάκτηση από Wind Power Monthly: <https://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines>

Troldborg, N., Sørensen, J. N., & Mikkelsen, R. F. (2006). *Numerical simulations of wakes of wind turbines in wind farms*. In European Wind Energy Conference .

Ζούζιας, Δ. (2012). *Αξιολόγηση Απλοποιημένων Προτύπων Ομόρρου. Μεταπτυχιακή Εργασία*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.